



TUGAS AKHIR - MO141326

ANALISA *SCOURING* PIPA BAWAH LAUT MILIK PETRONAS
CARIGALI KETAPANG II LTD. BUKIT TUA *DEVELOPMENT*
PROJECT KETAPANG PSC

FARIS RASYADI

NRP. 4311 100 087

Dosen Pembimbing:

Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Tekonolgi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2016



FINAL PROJECT - MO141326

**SCOURING ANALYSIS OF PETRONAS CARIGALI KETAPANG
II LTD.'S UNDERWATER PIPELINE, BUKIT TUA
DEVELOPMENT PROJECT KETAPANG PSC**

FARIS RASYADI

REG. 4311 100 087

Supervisors:

Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2016

**ANALISA SCOURING PIPA BAWAH LAUT MILIK PETRONAS
CARIGALI KETAPANG II LTD. BUKIT TUA DEVELOPMENT
PROJECT KETAPANG PSC**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

FARIS RASYADI
NRP. 4311 100 087

Disetujui oleh :



Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.

(Pembimbing 1)

Dr. Eng. Weyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

(Pembimbing 2)

3. Sholihin, S.T. MT.

(Penguji 1)

4. R. Haryo Dwito A., S.T., M.Eng., Ph.D.

(Penguji 2)

5. Drs. Mahmud Musta'in, M.Sc., Ph.D.

(Penguji 3)

6. Wimala Latitya Dhanistha, S.T., M.T.

(Penguji 4)

SURABAYA, JANUARI 2016

**ANALISA SCOURING PIPA BAWAH LAUT MILIK PETRONAS
CARIGALI KETAPANG II LTD. BUKIT TUA DEVELOPMENT
PROJECT KETAPANG PSC**

Nama Mahasiswa : Faris Rasyadi

NRP : 4311100087

Jurusan : Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc

ABSTRAK

Pipa bawah laut (*Pipeline*) adalah salah satu fasilitas yang memegang peranan penting dalam siklus distribusi minyak dan gas bumi di Indonesia. Penggunaan pipa bawah laut terbukti menjadi infrastruktur transportasi jarak jauh minyak dan gas bumi yang paling efisien karena bisa bekerja selama 24 jam sehari tanpa henti dan tidak terkendala oleh cuaca.. Banyak masalah yang muncul pada sistem perpipaan bawah laut, seperti stabilitas pipa saat terkena beban – beban hidrodinamis atau fenomena *scouring* yang dapat menimbulkan bentangan bebas (*freespan*) pada pipa yang bisa mengakibatkan defleksi pada pipa. Penelitian ini membahas perihal bagaimana stabilitas pipa bawah laut baik secara vertikal maupun lateral dan berapa kedalaman serta lebar *scouring* yang terjadi di sepanjang jalur pipa bawah laut. Berdasarkan hasil analisa stabilitas pipa bawah laut didapat nilai SF_v pada perairan dalam maupun transisi sebesar 1,86 dan nilai SF_L pada perairan transisi sebesar 5,8 dan sebesar 4,95 pada perairan dalam. Dari hasil perhitungan tersebut pipa bawah laut dapat dikatakan stabil secara vertikal maupun lateral karena nilainya lebih besar dari safety factor sebesar 1,1 sebagaimana disyaratkan oleh code DNV RP E305. Fenomena gerusan lokal (*scouring*) juga terjadi pada jalur pipa bawah laut ini. Berdasarkan analisa didapatkan estimasi kedalaman lubang *scour* maksimum sebesar 0,54 m dan estimasi lebar lubang *scour* maksimum sebesar 3,87 m.

Kata kunci : Stabilitas Pipa, Soil Liquefaction, Scouring

**SCOURING ANALYSIS OF PETRONAS CARIGALI KETAPANG II
LTD.'S UNDERWATER PIPELINE, BUKIT TUA DEVELOPMENT
PROJECT KETAPANG PSC**

Name : Faris Rasyadi
NRP : 4311100087
Major : Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Supervisor : Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng.
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc

ABSTRACT

Underwater pipeline is one of the facilities that held important role on oil and gas distribution cycle in Indonesia. The usages of underwater pipeline are proven to be the most efficient long haul transportation structure, because of the ability to work 24 hours nonstop even in a heavy rain. There are lots of problems spawning on underground pipeline such as pipeline stability due to hydrodynamics load, or scouring phenomena which could lead to freespan, continuing to pipeline deflection. This experiments discussed about underwater pipeline stability in vertical and lateral form, and also the width and depth of scouring which happens nearby the pipeline. Based on the results of underwater pipeline stability analysis, the value of SFv in deep water and intermediate water is 1.86 and the value of SFI in intermediate water is 5.85 and 4.95 in deep water. Based on those calculations underwater pipeline can be considered stable vertically or laterally, assuming their amount are greater than safety factor, valued 1.1 according to DNV RP E305. Scouring phenomena are also happened on this underwater pipeline. Based on the analysis, the estimated depth of scour maximum is valued at 0.54 m and estimated scour length maximum valued at 3.87 m.

Kata kunci : Pipeline stability, Soil liquefaction, Scouring

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum. Wr. Wb

Segala syukur penulis ucapkan atas limpahan rahmat dan segala karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul " ANALISA SCOURING PIPA BAWAH LAUT MILIK PETRONAS CARIGALI KETAPANG II LTD. BUKIT TUA DEVELOPMENT PROJECT KETAPANG PSC".

Penyusunan tugas akhir ini dilakukan sebagai pemenuhan salah satu syarat demi menyelesaikan studi sarjana (S-1) Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Tugas akhir ini membahas perihal stabilitas pipa bawah laut dan memperhitungkan apakah fenomena gerusan lokal (*scouring*).

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam tugas akhir ini, sehingga diharapkan kritik maupun saran dari pembaca terhadap penyempurnaan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan khususnya bagi mahasiswa di bidang minyak & gas.

Demikian terimakasih, Wassalamualaikum. Wr. Wb

Surabaya, Januari 2016

Faris Rasyadi

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan.....	i
Abstrak.....	ii
Kata Pengantar.....	iv
Ucapan Terima Kasih.....	v
Daftar Isi.....	vi
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Tabel.....	ix
Daftar Notasi.....	x
Daftar Lampiran.....	xiii
Bab I Pendahuluan	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
Bab II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori	
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori.....	6
2.2.1 Konsep Umum.....	6
2.2.2 Kondisi Pembebanan.....	8
2.3 Analisa Stabilitas Pipa Bawah Laut.....	8
2.3.1 Analisa Tegangan Ijin.....	10
2.3.2 Berat Terendam Pipa.....	10
2.3.3 Gaya Hidrodinamis.....	12
2.3.4 Perhitungan Koef. Gesek Tanah.....	14
2.4 Teori Gelombang.....	15
2.4.1 Penentuan Teori Gelombang.....	16
2.4.2 Teori Gelombang Stokes.....	17
2.4.3 Perhitungan Kecepatan Arus.....	17
2.4.4 Reynold Number.....	18
2.4.5 Keulegan Carpenter Number.....	19
2.4.6 Parameter Lingkungan.....	19
2.5 Soil Liquefaction.....	21

2.5.1 Metode Untuk Mengevaluasi Terjadinya Soil Liquefaction.....	22
2.6 Scouring.....	24
2.6.1 Berat Vertikal Air.....	25
2.6.2 Stabilitas Tanah.....	26
2.6.3 Konsep Kekuatan Geser Tanah.....	26
2.6.4 Estimasi Perhitungan Kedalaman Scouring.....	27
2.6.4.1 Kedalaman Scouring Akibat Arus.....	27
2.6.4.2 Kedalaman Scouring Akibat Gelombang.....	28
2.6.4.3 Kedalaman Scouring Akibat Arus & Gelombang.....	29
2.6.5 Lebar Scouring.....	29
Bab III Metodologi Penelitian	
3.1 Diagram Alir.....	31
3.2 Prosedur Penelitian	32
Bab IV Analisa dan Pembahasan	
4.1 Pengumpulan data.....	35
4.1.1 Data Pipa.....	35
4.1.2 Data Lingkungan.....	36
4.2 Stabilitas Pipa.....	40
4.2.1 Analisa Stabilitas Vertikal.....	40
4.2.2 Analisa Stabilitas Lateral.....	41
4.3 Soil Liquefaction.....	42
4.4 Analisa Scouring.....	44
4.4.1 Kedalaman Scouring.....	45
4.4.2 Lebar Scouring.....	55
BAB V Kesimpulan & Saran	
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran.....	57
Daftar Pustaka.....	59
Lampiran	

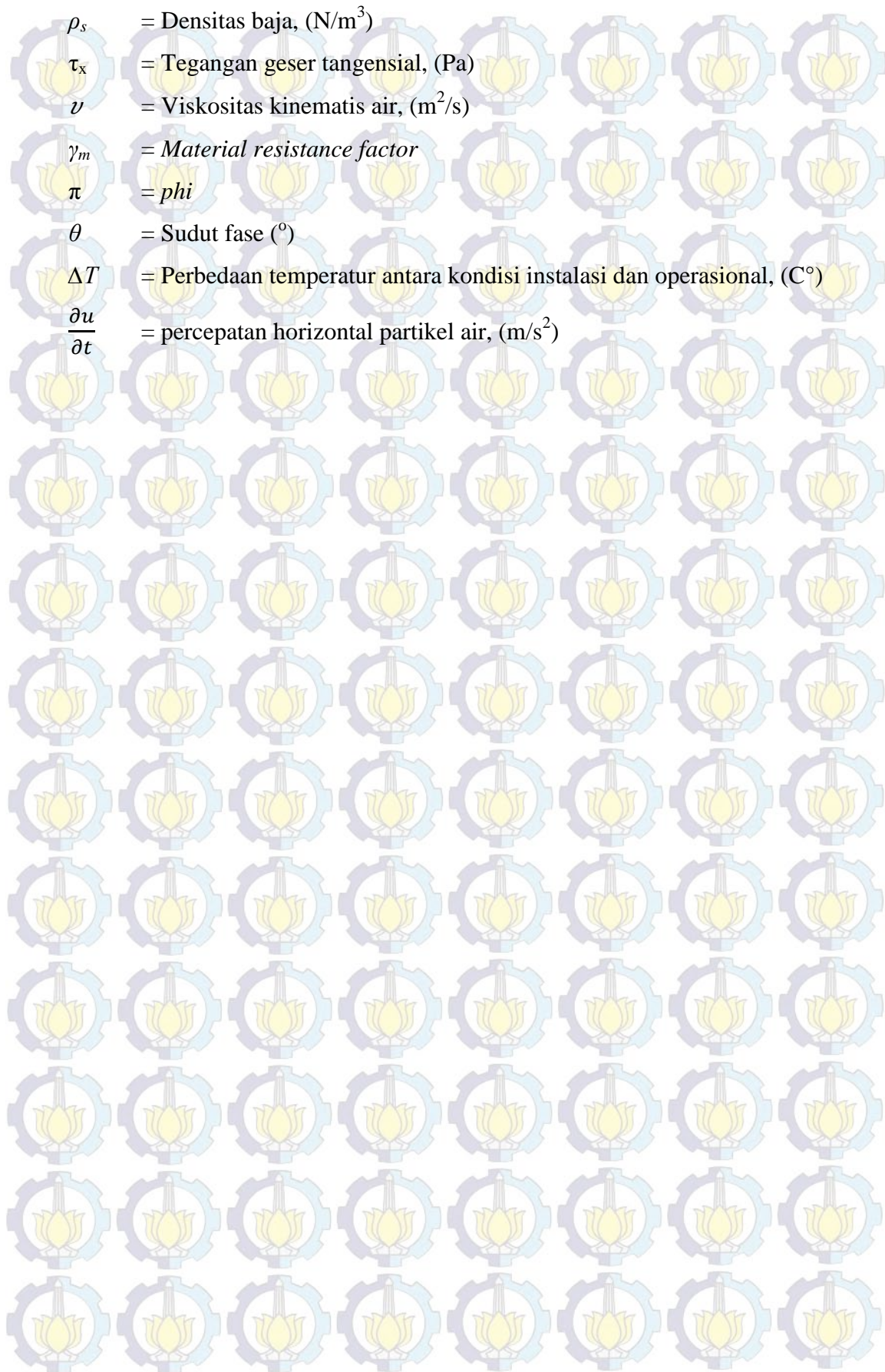
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Lokasi pipa milik Petronas Carigali Ketapang II Ltd	1
Gambar 2.1 Bentuk vortex flow penyebab terjadinya scouring.....	7
Gambar 2.2 Overview of Design Method	9
Gambar 2.3 Potongan Pipa Melintang.....	11
Gambar 2.4 Gaya Hidrodinamis pada pipa	13
Gambar 2.5 Faktor kalibrasi Fw sebagai fungsi K dan M	14
Gambar 2.6 Parameter Gelombang	15
Gambar 2.7 Regions of Validity of Wave Theori.....	17
Gambar 2.8 Determinasi dari kecepatan gelombang signifikan	19
Gambar 2.9 Kondisi partikel tanah saat mengalami getaran	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	32
Gambar 4.1 Ilustrasi Scour Depth & Scour Length.....	45
Gambar 4.2 Grafik Kecepatan Maksimum Partikel di <i>seabed</i>	47
Gambar 4.3 Grafik kedalaman lubang scouring akibat gelombang (1).....	49
Gambar 4.4 Grafik kedalaman lubang scouring akibat gelombang (2).....	50
Gambar 4.5 Grafik kedalaman lubang scouring akibat gelombang (3).....	50
Gambar 4.6 Grafik kedalaman scouring akibat arus dan gelombang (1).....	53
Gambar 4.7 Grafik kedalaman scouring akibat arus dan gelombang (2)	54
Gambar 4.8 Grafik kedalaman scouring akibat arus dan gelombang (3)	54
Gambar 4.9 Grafik lebar lubang scour (1)	55
Gambar 4.10 Grafik lebar lubang scour (2)	56
Gambar 4.11 Grafik lebar lubang scour (3)	56

DAFTAR NOTASI

A_e	= Luas permukaan luar penampang melintang pipa, (m ²)
A_i	= Luas permukaan dalam penampang melintang pipa, (m ²)
A_s	= Luas penampang pipa, (m ²)
C_D	= Koefisien <i>drag</i>
C_L	= Koefisien <i>lift</i>
C_M	= Koefisien inersia
d	= Kedalaman perairan, (m)
D	= Diameter pipa, (m)
D_s	= Kedalaman scour (m)
D_{max}	= Diameter pipa terbesar yang diukur, (m)
D_{min}	= Diameter pipa terkecil yang diukur, (m)
D_{tcc}	= Tebal dinding (<i>coating+concrete</i>), (m)
E	= Modulus elastisitas baja, (Pa)
F_D	= <i>Drag force</i> , (N)
F_H	= Beban hidrodinamik, (N/m)
F_I	= <i>Inertia force</i> , (N)
g	= Percepatan gravitasi, (m/s ²)
H	= Ketinggian gelombang pada titik yang ditinjau, (m)
h	= Jarak antara titik referensi dengan permukaan air laut, (m)
I	= Momen inersia, (m ⁴)
L	= Panjang gelombang, (m)
OD	= <i>Outside diameter</i> , (m)
P_d	= <i>Pressure design</i> , (Pa)
p_{li}	= Tekanan lokal insidental, (Pa)
P_{min}	= Tekanan internal minimum, (Pa)
q	= Beban total pipa, (N/m)
r	= Selisih antara diameter terluar dengan ketebalan dinding pipa, (m)
Re	= <i>Reynolds number</i>
s	= Jarak vertikal titik yang ditinjau dari dasar laut, (m)
T	= Periode gelombang, (s)

T_{max}	= <i>Maximum Design Temperature</i> , (°C)
T_{min}	= <i>Installation Temperature</i> , (°C)
t_{CA}	= <i>Corrosion allowance</i> , (m)
t_{cc}	= Tebal selimut beton, (m)
t	= Waktu yang ditempuh untuk mencapai jarak horizontal titik yang ditinjau, (s)
t_{corr}	= Tebal lapisan anti korosi, (m)
U	= Kecepatan horizontal partikel air, (m/s)
U_c	= Kecepatan partikel arus efektif, (m/s)
U_D	= Kecepatan partikel arus, (m/s)
U_e	= Kecepatan arus dan gelombang efektif, (m/s)
U_{eff}	= kecepatan efektif partikel air pada ketinggian y_o , (m/s)
U_o	= kecepatan horizontal partikel air yang diketahui pada y_o , (m/s)
U_r	= kecepatan arus stabil, (m/s)
U_w	= Kecepatan partikel gelombang efektif, (m/s)
W/D	= Lebar scour
W	= Beban terdistribusi merata, (N/m)
W_{buoy}	= Berat gaya apung, (N/m)
W_{cc}	= Berat selimut beton, (N/m)
W_{cont}	= Berat isi pipa, (N/m)
W_{corr}	= Berat lapisan anti korosi, (N/m)
W_{st}	= Berat pipa baja, (N/m)
W_{sub}	= Beban pipa terendam, (N/m)
WT	= <i>Wall thickness</i> , (m)
y_o	= Ketinggian orbit partikel dari dasar laut, (m)
Z_o	= faktor kekasaran <i>seabed</i> , (m)
Z_r	= ketinggian arus di atas <i>seabed</i> , (m)
α_u	= <i>Material strength factor</i>
ρ	= Densitas air laut, (N/m ³)
ρ_{cc}	= Densitas selimut beton, (N/m ³)
ρ_{cont}	= Densitas fluida dalam pipa, (N/m ³)
ρ_{corr}	= Densitas lapisan anti korosi, (N/m ³)



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Allowable Stress	10
Tabel 2.2 Berat pipa saat kondisi operasi.....	12
Tabel 2.3 Penentuan Faktor Kalibrasi Gesek Tanah.....	14
Tabel 2.4 Parameter Kekasaran seabed.....	14
Tabel 2.5 Recommended Hydrodynamics Coefficient	19
Tabel 2.6 Grain size untuk seabed material	20
Tabel 2.7 Nilai koefisien tekanan tanah	23
Tabel 4.1 Pipeline Properties	35
Tabel 4.2 Tidal Range	36
Tabel 4.3 Directional Current Velocity Data	37
Tabel 4.4 Directional Enviromental Data Along Pipeline Route (1).....	37
Tabel 4.5 Directional Enviromental Data Along Pipeline Route (2).....	38
Tabel 4.6 Water Depth	38
Tabel 4.7 Sea Water Properties	39
Tabel 4.8 Sea Bed Soil Properties	39
Tabel 4.9 Konfigurasi kedalaman relatif	40
Tabel 4.10 Hasil analisa stabilitas vertikal pipa	41
Tabel 4.11 Hasil analisa stabilitas lateral pipa	41
Tabel 4.12 Hasil analisa soil liquefaction.....	42
Tabel 4.13 Kedalaman scouring akibat arus.....	46
Tabel 4.14 Kedalaman Scouring akibat gelombang	47
Tabel 4.15 Kedalaman scouring akibat arus & gelombang	51

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

PERHITUNGAN STABILITAS PIPA

LAMPIRAN 2

PERHITUNGAN *SCOURING*

BAB I

PENDAHULUAN

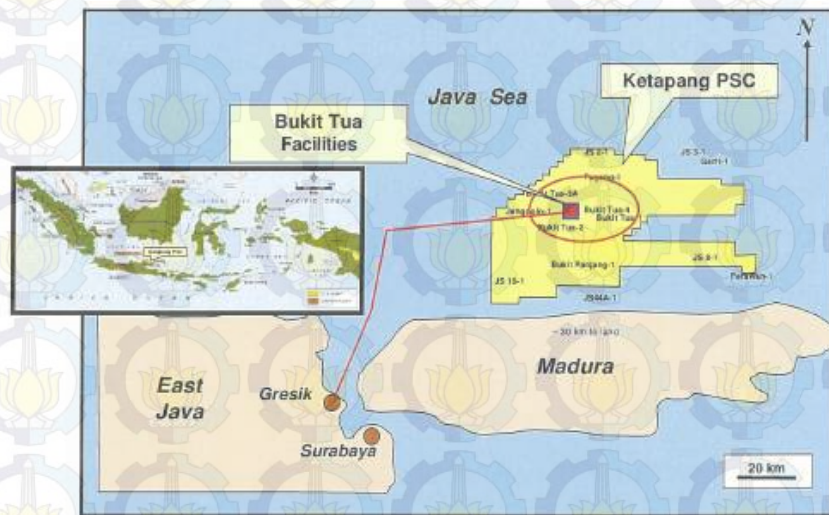
1.1. Latar Belakang Masalah

Pipa bawah laut (*Pipeline*) adalah salah satu fasilitas yang memegang peranan penting dalam siklus distribusi minyak dan gas bumi di Indonesia. Penggunaan pipa bawah laut terbukti menjadi infrastruktur transportasi jarak jauh minyak dan gas bumi yang paling efisien karena bisa bekerja selama 24 jam sehari tanpa henti dan tidak terkendala oleh cuaca. Mahalnya biaya konstruksi bawah laut menjadi hal yang harus diperhitungkan, sehingga pipa bawah laut harus didesain dan dianalisis sebaik mungkin agar dapat beroperasi sesuai dengan tujuannya.

Pada saat proses instalasi pipa, struktur pipa tersebut akan mengalami tegangan yang dapat mengakibatkan pipa mengalami *buckling*. Setelah terpasang, pipa akan menerima gaya-gaya dari luar yang berupa gaya hidrostatik dan gaya hidrodinamik yang timbul akibat kondisi lingkungan. Sedangkan pada saat beroperasi, pipa akan menerima gaya tambahan berupa tekanan internal yang berasal dari aliran fluida di dalamnya dan tekanan longitudinal yang disebabkan oleh pemuaian pipa akibat meningkatnya suhu. Pemuaian tersebut dapat menyebabkan bentangan bebas pada pipa (*free span*), yang dapat mengakibatkan defleksi pada pipa. *Free span* dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya akibat kondisi batimetri yang tidak rata, akibat proses penggerusan dasar laut (*scouring*), dan juga akibat *crossing* dengan pipa lainnya yang telah ada pada daerah eksplorasi migas tersebut.

Salah satu jaringan pipa bawah laut di Indonesia adalah milik Petronas Carigali Ketapang II Ltd, yang terletak di laut Jawa. Dikarenakan jalur pipa bawah laut ini penting demi menjaga ketersediaan gas bagi industri di Jawa Timur maka diperlukan adanya analisis gerusan pada kondisi lingkungan *eksisting*. Daerah studi pada tugas akhir ini berlokasi perairan Laut Jawa, pada proyek gas expansion Bukit Tua Development Project Ketapang PSC, Jawa Timur yang menghubungkan *Well Head Platform* (WHP) di kawasan ladang minyak Bukit Tua, Jawa Timur dengan *Onshore Receiving Facilities* (ORF) di Gresik. Adapun

jalur pipa pada Bukit Tua Development Project Ketapang PSC dapat dilihat pada **Gambar 1.**



Gambar 1.1. Lokasi pipa milik Petronas Carigali Ketapang II Ltd.

Tugas akhir ini akan menganalisa perihal *scouring* yang terjadi pada dasar laut di bawah pipa milik Petronas Carigali Ketapang II Ltd. Berdasarkan kondisi tanah dan kondisi lingkungan perairan dibawah *pipeline* milik petronas, Ada kemungkinan terjadinya *scouring* yang mengenai tanah dimana pipa diletakkan. *Scouring* yang mengenai tanah di bawah atau di sekitar pipa dapat menyebabkan rongga di bawah pipa yang sangat mungkin mengakibatkan timbulnya bentangan bebas. Bentangan bebas (*freespans*) yang terjadi akan menimbulkan gerakan osilasi pipa sehingga menyebabkan kondisi *fatigue* pada saat tertentu jika frekuensinya melebihi frekuensi natural pipa (Narayanan, 2008). Disamping itu, dengan adanya *freespans* akan memungkinkan terjadinya gangguan stabilitas (perubahan kedudukan) terhadap pipa gas bawah laut sebagai akibat dari perubahan gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja di lokasi *scouring* (Hermawan, 2001).

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana stabilitas vertical dan lateral pipa bawah laut?
2. Berapa kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi?

1.3 Tujuan

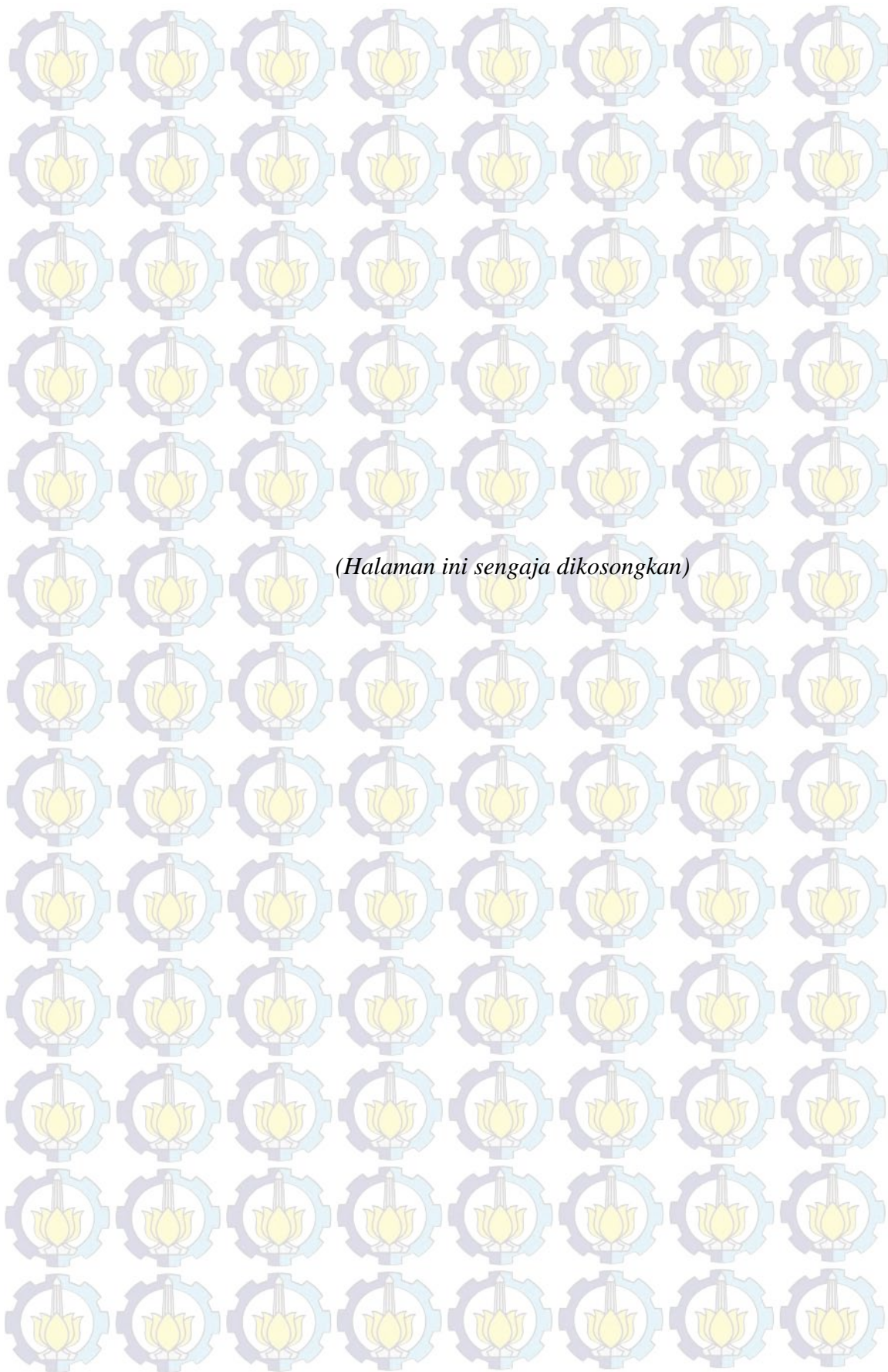
1. Mengetahui stabilitas vertical dan lateral pipa bawah laut.
2. Mengetahui berapa kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi.

1.4 Manfaat

Manfaat tugas akhir ini adalah mengetahui stabilitas pipa terendam. Selain itu juga untuk mengetahui pola gelombang, distribusi arus, tekanan air vertical dan stabilitas tanah yang ada disekitaran pipa sehingga mengetahui apakah penggerusan tanah bawah laut (*scouring*) dapat terjadi dan berapa lebar dan kedalaman nya. Penelitian ini dilakukan agar mahasiswa dibidang riset *offshore pipeline* lebih mengetahui hal-hal apa saja yang harus diperhatikan dalam desain suatu *pipeline*. Dari hasil analisa dapat diketahui berapa kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi pada *seabed* tempat meletaknya pipa. Sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi produksi minyak dan gas selama beroperasi.

1.5 Batasan Masalah

1. Titik lokasi yang dianalisa berdasarkan variasi kedalaman relative (d/L) (*shallow water wave, intermediate depth wave, deep water wave*).
2. Standart yang dipakai untuk menghitung stabilitas vertical dan lateral pipa bawah laut adalah DNV RPE 305.
3. Analisa stabilitas pipa dilakukan hanya pada pipa yang meletak diatas *seabed*.
4. Profil arus dari permukaan sampai dasar laut mempunyai arah yang sama.
5. Propagasi (laju) *scouring* tidak diperhitungkan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Istilah *pipeline* diartikan sebagai bentangan pipa fluida dengan jarak yang sangat panjang. Komoditas yang sering ditransportasikan adalah air, gas alam, minyak mentah, dan produksi hasil pengolahan minyak bumi lainnya (Liu, Henry 2003). *Pipeline* digunakan dalam berbagai macam tujuan, salah satu diantaranya adalah sebagai *trunk line* yakni mengangkut minyak dan/atau gas dari fasilitas produksi menuju daratan (Mousselli, 1981). Pipa bawah laut ini adalah salah satu alternatif lain dalam pemindahan fluida di laut selain menggunakan kapal tanker. Memang, biaya investasi yang diperlukan untuk membangun struktur pipa bawah laut lebih besar daripada biaya pembuatan kapal tanker, namun biaya operasi yang diperlukan jauh lebih kecil sehingga pemakaian pipa bawah laut sebagai sarana pemindahan fluida yang sangat banyak digunakan. Selain itu, ketika pipa beroperasi tidak terpengaruh oleh cuaca sehingga meskipun cuaca buruk pemindahan minyak ataupun gas melalui pipa bawah laut tetap dapat berlangsung.

Pipelines digunakan untuk berbagai jenis kegiatan dalam pengembangan sumber daya alam berupa minyak dan gas bumi di lepas pantai. Penggunaan *pipelines* pada lepas pantai diantaranya adalah pipa transportasi untuk ekspor, pipa penyalur untuk mengangkut produksi dari suatu *platform* ke pipa ekspor, pipa pengalir untuk mengangkut produksi antar suatu *platform*, *subsea manifold* dan *satellite welds* serta *pipelines bundle*. Dikarenakan fungsi pipa bawah laut yang vital, maka dalam perancangan, instalasi, dan perawatan dibutuhkan pertimbangan yang lebih seksama. Pertimbangan tersebut antara lain menganalisa *freespans* dilakukan setelah proses inspeksi pipa pasca instalasi. *Freespans* pipa bawah laut adalah suatu keadaan dimana terbentuk bentangan pipa dengan panjang tertentu yang memiliki jarak (*gap*) terhadap *seabed*. Bentangan bebas ini akan sangat berbahaya terhadap konstruksi pipa itu sendiri, dimana bisa mengakibatkan kerusakan. Beban statis yang timbul bisa mengakibatkan pipa terkena beban siklis. Beban dinamis bisa menimbulkan fenomena *vortex shedding*, dimana bisa menyebabkan getaran dan osilasi pada pipa.

Secara umum pipa bawah laut bisa diklasifikasikan sebagai berikut (Soegiono, 2007) :

1. Pipa yang mengalirkan minyak atau gas dari *satellite subsea wells* menuju *subsea manifolds*.
2. Pipa yang mengalirkan minyak atau gas dari *subsea manifolds* menuju ke *production facility platforms*.
3. Pipa yang mengalirkan minyak atau gas antar *production facility platforms*.
4. Pipa yang mengalirkan minyak atau gas dari *production facility platforms* menuju ke darat.
5. Pipa yang mengalirkan air atau bahan – bahan kimia dari *production facility platforms* melalui *subsea injection manifolds* menuju ke *injection wellheads*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Konsep Umum

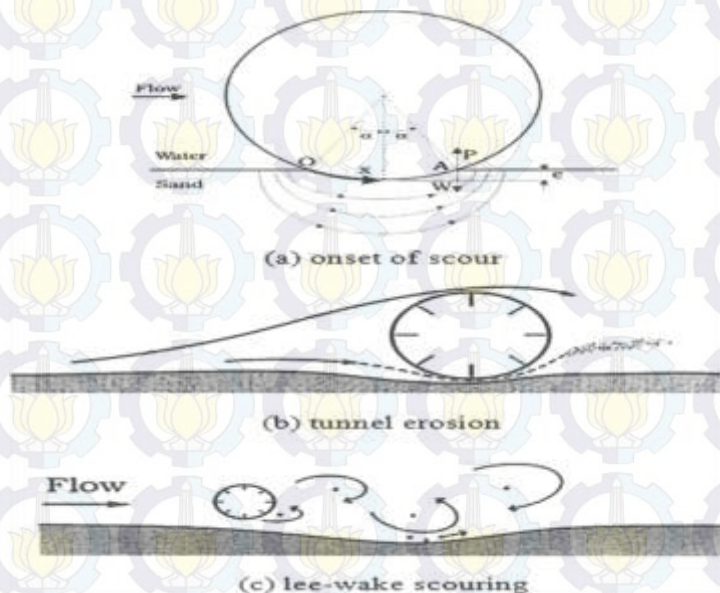
Scouring adalah fenomena alam yang disebabkan oleh aliran air laut. Peristiwa ini banyak terjadi pada material tanah *silt* atau *sand*, tetapi juga dapat terjadi pada keadaan berbatu atau berkarang dengan kondisi tertentu. Sehingga *scouring* bisa diartikan pergerakan dari tanah dasar perairan yang disebabkan oleh arus dan gelombang yang prosesnya sama seperti erosi yang secara alami dan dapat juga disebabkan oleh elemen struktur yang dekat dengan dasar laut (Mousselli, 1981).

Narayanan (2008) mengemukakan apabila dasar laut terdiri dari material yang mudah terkorosi, keseimbangan dinamik dari sedimen akan terganggu dan tergerus (*scour*) lalu sedimen akan terdeposisi. *Scouring* yang terjadi pada pipa digambarkan bahwa pipa merupakan halangan yang menyebabkan terjadinya perubahan pola dan arah aliran partikel air. Aliran yang timbul merupakan turbulen yang akan menggerakkan butiran material tanah sebagai proses dari penggerusan. Perlahan – lahan sedimen bergerak dari bawah pipa sehingga pola pergerakan pun berubah dan menghasilkan *vortices shead* dari

setiap sisi pipa. *Vortices* ini yang dapat mengakibatkan osilasi secara vertical maupun horizontal pada pipa.

Proses terjadinya *scouring* pada kondisi arus tetap (*steady current*) dapat dijelaskan sebagai perilaku *vortex flow* pada instalasi pipa bawah laut. *Vortex flow* ini merupakan aliran *irrational* dengan kecepatan yang arahnya memutar. Menurut Chiew (1997) perilaku *vortex flow* ini akan menghasilkan tiga jenis *scouring* yang berbeda – beda yang terjadi pada pipa yaitu :

- a) *Luft scour*, terjadi pada *upstream* (bagian pipa yang berhadapan dengan arah aliran) pipa akibat formulasi eddy pada *upstream* pipa
- b) *Lee – wake scour*, penggerusan ini terjadi pada bagian *downstream* pipa karena aliran melewati pipa yang menyebabkan terjadinya turbulensi pada bagian tersebut. *Vortex flow* akan menggerus dari arah bagian belakang struktur yang berlawanan dengan arah datangnya aliran
- c) *Tunnel scour*, terjadi di bawah pipa dan merupakan pengaruh dari perubahan kecepatan aliran di bawah pipa. Proses ini akan berlangsung sampai terjadi kesetimbangan yaitu besarnya gaya geser dan aliran turbulen tidak mampu membawa material sedimen.



Gambar 2.1 Bentuk *vortex flow* penyebab terjadinya *scouring* (Cheng, 2013)

2.2.2 Kondisi Pembebanan

Selama umur operasi pipa bawah laut, ada 3 jenis kondisi pembebanan, antara lain (Kenny, 1993) :

a. Instalasi

Beban yang bekerja pada pipa saat kondisi ini antara lain : beban gelombang dan arus serta beban dari berat pipa itu sendiri. Tegangan yang terjadi pada kondisi ini dipengaruhi oleh metode instalasi yang digunakan.

b. *Hydrotest*

Kondisi *hydrotest* dilakukan untuk menguji kekuatan pipa dengan memberikan tekanan yang besar kedalam pipa. Beban yang mempengaruhi adalah tekanan dalam pipa (*internal pressure*) dan tentunya berat pipa yang bertambah akibat adanya air laut.

c. Operasi

Setelah instalasi dan *hydrotest*, berikutnya adalah fase operasi, dimana pipa mulai digunakan untuk mengalirkan fluida yang ditentukan. Tekanan dalam yang serta temperatur yang sangat tinggi akan mempengaruhi formasi dan tegangan pada pipa.

2.3 Analisa Stabilitas Pipa Bawah Laut

Desain stabilitas dari pipa merupakan interaksi yang kompleks antara pergerakan arus yang melalui pipa, baik arus yang dibangkitkan oleh gelombang maupun arus yang dibangkitkan oleh pasang surut yang menimbulkan terjadinya gaya-gaya hidrodinamika pada pipa, dan kombinasi antara total berat tenggelam pipa dengan koefisien gesek antara permukaan pipa dengan tanah.

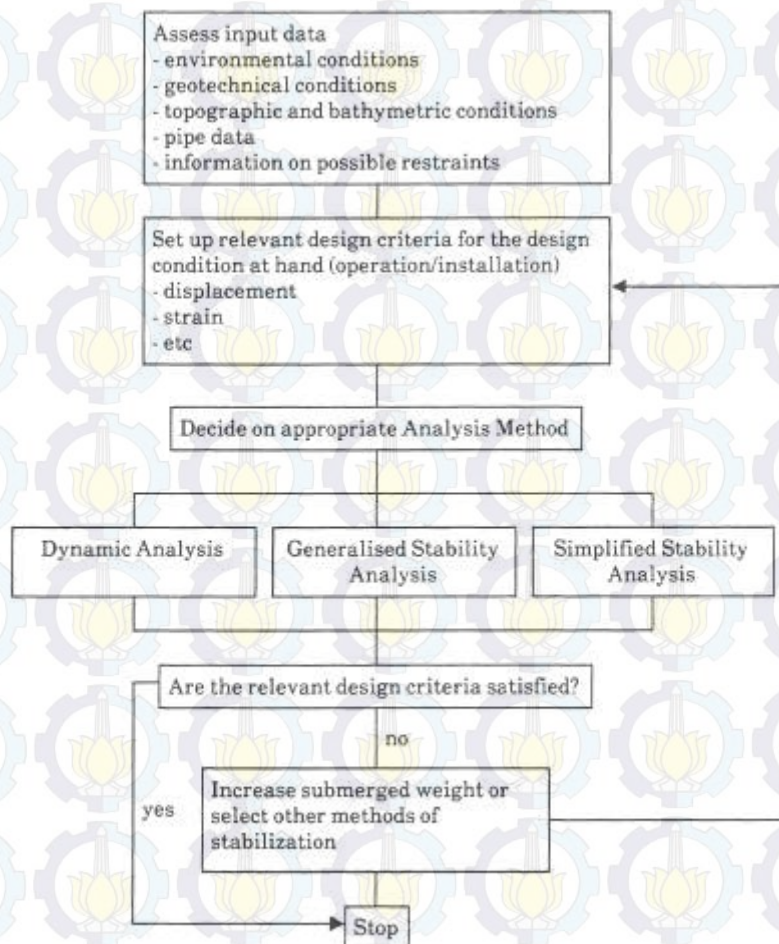
Analisa sederhana dari stabilitas pipa dasar laut dapat dilakukan dengan berdasar pada keseimbangan statis antara penerapan gaya-gaya hidrodinamika dengan kombinasi gaya penahan tanah. Gaya penahan tanah sebenarnya merupakan gaya gesek yang terdapat pada pertemuan permukaan pipa dengan tanah. Berikut ini adalah gaya-gaya yang terlibat dalam stabilitas :

1. Berat isi dan berat tenggelam pipa.
2. Kombinasi gaya drag.
3. Kombinasi gaya angkat.
4. Gaya inersia
5. Gaya friksi penahan antara permukaan pipa dengan dasar laut.

Dalam DNV RP-E305 mengenai *On Bottom Sability Design of Submarine Pipeline*, bisa digunakan tiga jenis metode analisis, yaitu :

1. Analisis dinamis.
2. Analisis kestabilan umum.
3. Analisis kestabilan statis sederhana.

Berikut adalah bagan dari desain stabilitas pipa bawah laut (DNV-RP-E305)



Gambar 2.2 Overview of Design Method

2.3.1 Analisa Tegangan Ijin

Metode perhitungan dan analisa tegangan – tegangan yang mungkin bekerja pada sistem pipa telah diatur mengikuti *code* standar tertentu sesuai dengan operasi dan kondisi sistem pipa tersebut. Dalam hal ini untuk pipa penyalur gas digunakan *code* standar ASME B31.8 2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*. Selain itu juga akan digunakan *code* standar lain yang bersesuaian dengan kondisi internal dan eksternal sistem pipa.

Sesuai dengan kode standar ASME B31.8 2000, maka terdapat batasan – batasan besarnya tegangan bekerja yang diijinkan pada sistem pipa baik pada saat instalasi maupun pada saat pipa beroperasi. Berdasarkan *code* ini tegangan bekerja yang diijinkan pada sistem pipa penyalur adalah :

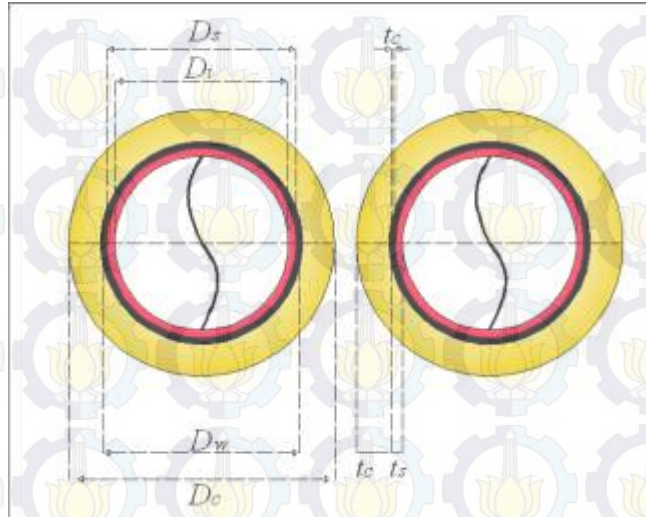
Tabel 2.1 Allowable Stress

Design Condition	Allowable		
	Hoop Stress	Longitudinal Stress	Combined Stress
Operation	72 % SMYS	80% SMYS	90 % SMYS
Hydrotesting	90% SMYS	72 % SMYS	96 % SMYS
Installation	72 % SMYS	80 % SMYS	90 % SMYS

Sebagai catatan, yang menjadi perhatian disini adalah tegangan bekerja pada saat operasional sistem pipa penyalur.

2.3.2 Berat Terendam Pipa

Ilustrasi potongan melintang sebuah pipa adalah seperti **Gambar 2.5** berikut ini :



Gambar 2.3 Potongan Pipa Melintang

Berikut ini rumus perhitungan berat terendam pipa :

- Diameter luar pipa

$$D = D_o + 2t_{cor} + 2t_c \quad \text{Pers. 5}$$

- Diameter dalam pipa

$$D_i = D_o - 2t_{st} \quad \text{Pers. 6}$$

- Berat baja di udara (W_{st})

$$W_{st} = \frac{\pi}{4} \rho_{st} (D_o^2 - D_i^2) g \quad \text{Pers. 7}$$

- Berat lapisan anti karat di udara (W_{cor})

$$W_{cor} = \frac{\pi}{4} \rho_{cor} [(D_o + 2t_{cor})^2 - D_i^2] g \quad \text{Pers. 8}$$

- Berat selimut beton di udara (W_c)

$$W_c = \frac{\pi}{4} \rho_c [(D_o + 2t_{cor} + 2t_c)^2 - (D_o + 2t_{cor})^2] g \quad \text{Pers. 9}$$

- Berat Pengisi pipa (W_{cont})

$$W_{cont} = D_i^2 \rho_{cont} g \quad \text{Pers. 10}$$

- Gaya apung (B)

$$B = \frac{\pi}{4} \rho_w (D_o + 2t_{cor} + 2t_c)^2 g \quad \text{Pers. 11}$$

- Berat Terendam Pipa

$$W_s = W_{st} + W_{cor} + W_c + W_{cont} - B \quad \text{Pers. 12}$$

- Berat Terendam Minimum Pipa

$$W_{s_req} = \left[\frac{(F_D + F_I) + \mu \cdot F_L}{\mu} \right] \cdot F_w$$

Pers. 13

Dengan :

D_o = Diameter luar pipa baja, (m)

D_i = Diameter dalam pipa baja, (m)

D_w = Diameter luar lapisan anti karat (*corrosin wrap*), (m)

D_c = Diameter luar selimut beton (*concrete coating*), (m)

t_{st} = Tebal pipa baja, (in)

t_{corr} = Tebal lapisan anti karat, (m)

t_c = Tebal selimut beton, (in)

W_{st} = berat baja di udara (N/m)

W_{corr} = berat lapisan anti karat di udara (N/m)

W_c = berat selimut beton di udara (N/m)

W_{cont} = berat muatan pada pipa (N/m)

W_s = berat terendam pipa (N/m)

B = gaya apung (N/m)

F_D = gaya drag (N/m)

F_I = gaya inersia (N/m)

F_L = gaya lift (N/m)

μ = faktor gesek tanah

F_w = faktor kalibrasi

W_{s_req} = berat tenggelam minimum pipa (N/m)

Tabel 2.2 Berat pipa saat kondisi operasi (DNV RPE 305, 1998)

Kasus	OD	Berat dari pipa, W
Operasi	$D + 2t_{cc} + 2t_{ic} + 2t_c$	$W_{cs} + W_L + W_{cc} + W_{ic} + W_c + W_i$

bouyancy pipa, berat terendam dan spesifik gravity dapat dikalkulasi dengan :

Bouyancy pipa

$$B = \pi/4 OD^2 \rho_{sw}$$

pers. 14

Berat pipa terendam

$$W_s = W - B$$

pers. 15

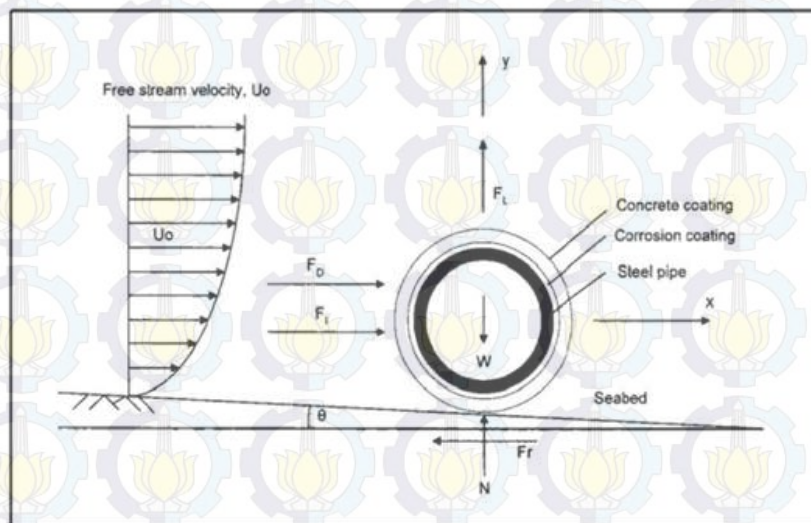
Spesifik Gravitasi pipa

$$SG = W/B = W_s/B + 1$$

pers. 16

2.3.3 Gaya Hidrodinamis

Gaya hidrodinamis sangat berpengaruh pada kestabilan struktur. Gaya hidrodinamis yang mengenai pipa antara lain gaya drag (*drag force*), gaya inertia (*inertia force*) dan gaya angkat (*lift force*).



Gambar 2.4 Gaya Hidrodinamis pada pipa (Mousselli, 1981)

Menurut *Det Norske Veritas RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Load*, gaya diatas dapat dirumuskan sebagai berikut :

- Gaya Drag (F_D)

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2$$

Pers. 17

- Gaya Inertia (F_I)

$$F_I = \rho C_M \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] \left(\frac{dU}{dt} \right)$$

Pers. 18

- Gaya Lift (F_L)

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U_e^2$$

Pers. 19

Dengan :

ρ = densitas fluida, kg/m^3

D = diameter luar pipa termasuk *concrete coating*, m

- U_e = kecepatan efektif partikel, m/s
 C_D = *coefficient drag*
 C_M = *coefficient inertia* atau *coefficient mass*
 C_L = *coefficient lift*

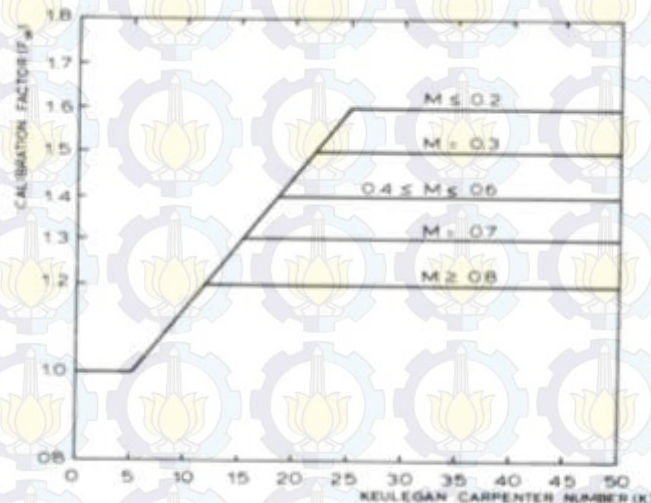
2.3.4 Perhitungan Koefisien Gesek Tanah

Tipe tanah yang ada pada *seabed* menjadi acuan untuk faktor kalibrasi gesek tanah (*Friction Calibration Factor*). Berikut adalah tabel penentuan kalibrasi gesek yang ada di aturan DNV RP E305 sesuai klasifikasi tanah.

Tabel 2.3 Penentuan Faktor Kalibrasi Gesek Tanah

Tipe Tanah	Faktor Kalibrasi Gesek
Sand	0,7
Clay	Sesuai Grafik Friction Factor (DNV RP E305)

Nilai faktor kalibrasi (F_w) diperlukan untuk menghitung berat tenggelam pipa yang dibutuhkan (W_{s_req}). Sedangkan untuk faktor kalibrasi dapat ditentukan dengan menggunakan grafik di bawah ini, yang sebelumnya kita sudah mendapatkan *Keulegan Carpenter Number* (K) dan Ratio arus ke kecepatan gelombang (M).



Gambar 2.5 Faktor kalibrasi F_w sebagai fungsi K dan M (DNV RP E-305)

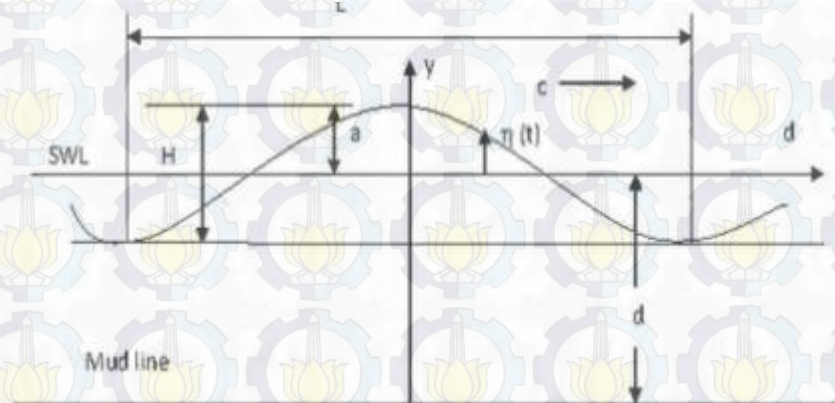
Untuk mendapatkan parameter kekerasan *seabed*, dapat ditentukan dengan menggunakan **Tabel 2.4** berikut ini,

Tabel 2.4 Parameter Kekasaran *Seabed* (DNV RP F109, 2010)

<i>Seabed</i>	<i>Grain Size d_{50} (mm)</i>	<i>Roughness Z_0 (m)</i>
Silt and clay	0.0625	$\approx 5 \times 10^{-6}$
Fine sand	0.25	$\approx 1 \times 10^{-5}$
Medium Sand	0.5	$\approx 4 \times 10^{-5}$
Coarse sand	1.0	$\approx 1 \times 10^{-4}$
Gravel	4.0	$\approx 3 \times 10^{-4}$
Pebble	25	$\approx 2 \times 10^{-3}$
Cobble	125	$\approx 1 \times 10^{-2}$
Boulder	500	$\approx 4 \times 10^{-2}$

2.4 Teori Gelombang

Gelombang terjadi akibat gangguan terhadap fluida. Gangguan tersebut dapat berupa gangguan pada permukaan air seperti hembusan angin atau dapat juga berupa gangguan pada dasar laut seperti pergerakan yanah ataupun gempa bumi. Bentuk ideal gelombang beramplitudo kecil di perairan dalam adalah sinusoidal. Karakteristik gelombang dua dimensi yang merambat dalam arah x dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.6 Parameter Gelombang

Dimana :

- a = amplitudo gelombang
- c = kecepatan gelombang
- d = kedalaman permukaan air rata rata dari dasar tanah

- H = tinggi gelombang dari lembah ke puncak
 L = panjang gelombang
 η = perpindahan arah horizontal dari puncak gelombang
 y = ketinggian gelombang dari SWL
 $h(t)$ = profil permukaan gelombang pada saat diatas SWL

Parameter parameter terpenting dalam menggambarkan gelombang adalah

1. Panjang gelombang L (jarak horizontal antara dua puncak gelombang atau dua lembah gelombang yang saling berurutan).
2. Tinggi gelombang H (jarak vertical antara puuncak gelombang dan lembah gelombang).
3. Periode gelombang T , (waktu yang ditempuh untuk mencapai satu lintasan gelombang).
4. Kedalaman perairan h , dimana gelombang tersebut dirambatkan.

Adapun parameter lain seperti kecepatan serta percepatan partikel air, kecepatan dan panjang gelombang dapat diturunkan dari teori gelombang.

2.4.1 Penentuan Teori Gelombang

Untuk menghitung beban gelombang yang bekerja pada pipa bawah laut, pertama – tama harus diketahui terlebih dahulu teori gelombang mana yang akan kita gunakan. Data – data yang diperlukan dalam penentuan teori gelombang adalah tinggi gelombang (H), periode gelombang (T), serta kedalaman perairan (d). Kemudian data – data tersebut dimasukkan ke dalam persamaan :

$$\left[\frac{H}{gt^2} \right] \text{ dan } \left[\frac{d}{gt^2} \right] \quad \text{pers. 21}$$

Persamaan tersebut kemudian digunakan dalam grafik *region of validity*.

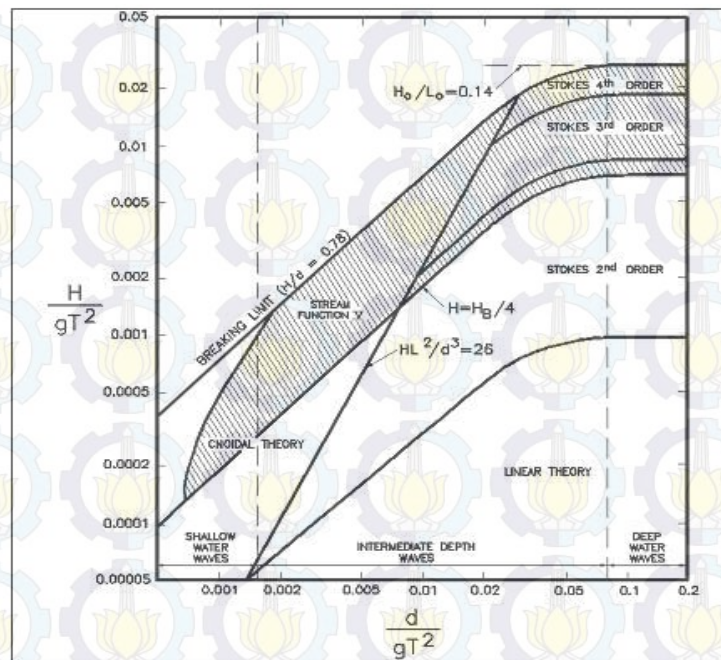


Figure II-1-20. Ranges of suitability of various wave theories (Le Méhauté 1976)

Gambar 2.7 Regions of Validity of Wave Theories

(Departement of the Army, 1984)

2.4.2 Teori Gelombang Stokes

Pada umumnya bentuk gelombang di alam adalah sangat kompleks dan sulit digambarkan secara matematis karena ketidak linieran, tiga dimensi, dan mempunyai bentuk random (Triatmodjo, 1999). Penentuan teori gelombang yang berlaku didasarkan pada parameter-parameter berupa tinggi gelombang, periodenya serta kedalaman laut yang diamati. Teori gelombang *stokes* merupakan solusi untuk perairan yang membutuhkan tingkat akurasi lebih tinggi dari teori gelombang linier. *Stokes* memasukkan ekspresi deret kecepatan potensial dalam persamaan *Laplace* dan syarat batas dasar laut. Koefisien dari deret tersebut merupakan pertambahan parameter yang dikaitkan dengan amplitudo dan panjang gelombang.

2.4.3 Perhitungan Kecepatan Arus

Rumus yang digunakan untuk menghitung kecepatan arus adalah (DNV F-109), sebagai berikut :

$$U_D = U_r \left[\frac{\left(1 - \frac{z_o}{D}\right) \left(\ln\left(\frac{D}{z_o} + 1\right) - 1\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_o} + 1\right)} \sin \theta_{curr} \right] \quad \text{Pers. 24}$$

Dengan :

U_D = kecepatan partikel air, (m/s)

D = diameter luar pipa, (m)

Z_o = parameter kekerasan *seabed*

Z_r = ketinggian diatas *seabed*

U_r = kecepatan arus, (m/s)

θ_{curr} = sudut datang arus

2.4.4 Reynold Number

Bilangan Reynold mengindikasikan bentuk aliran yang terbentuk dan berhubungan dengan tahanan suatu benda. Bilangan Reynold merupakan perbandingan antara *inertia force* (UD) dan *viscous forces*. Bilangan Reynold itu sendiri dirumuskan sebagai berikut :

$$Re = \frac{U_e D}{\nu_k} \quad \text{Pers. 25}$$

Dengan,

ν_k = viskositas kinematis fluida untuk air laut berkisar $1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

U_e = kecepatan efektif partikel (m/s)

D = diameter struktur (m)

Dalam aplikasinya *reynold number* dapat digunakan untuk menentukan koefisien hidrodinamik yang digunakan dalam perhitungan gaya-gaya hidrodinamik yang bekerja pada struktur silinder. Penentuan koefisien hidrodinamis dapat diperoleh dari tabel dibawah ini.

Tabel 2.5 Recommended Hydrodynamics Coefficient (Mousselli, 1981)

Reynold Number (Re)	Hydrodynamic Coefficient		
	Cd	Ci	Cl
$Re < 5.0 \cdot 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < Re < 1.0 \times 10^5$	1.6	1.0	2.0
$1.0 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$	2.0
$2.5 \times 10^5 < Re < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{Re}{5 \times 10^5}$
$Re > 5.0 \cdot 10^5$	0.7	0.7	1.5

2.4.5 Keulegan Carpenter Number

Pada dinamika fluida angka Keulegan Carpenter juga disebut angka periode, ialah suatu bilangan nondimensial yang mendeskripsikan hubungan antara gaya drag dengan gaya inertia yang menggerakkan objek dalam aliran fluida. Untuk nilai KC yang kecil maka gaya inertia yang dominan sedangkan jika nilai KC yang besar maka gaya drag yang dominan. Nilai KC dirumuskan sebagai :

$$KC = \frac{U_m \times T_w}{D} \quad \text{pers. 26}$$

Dimana :

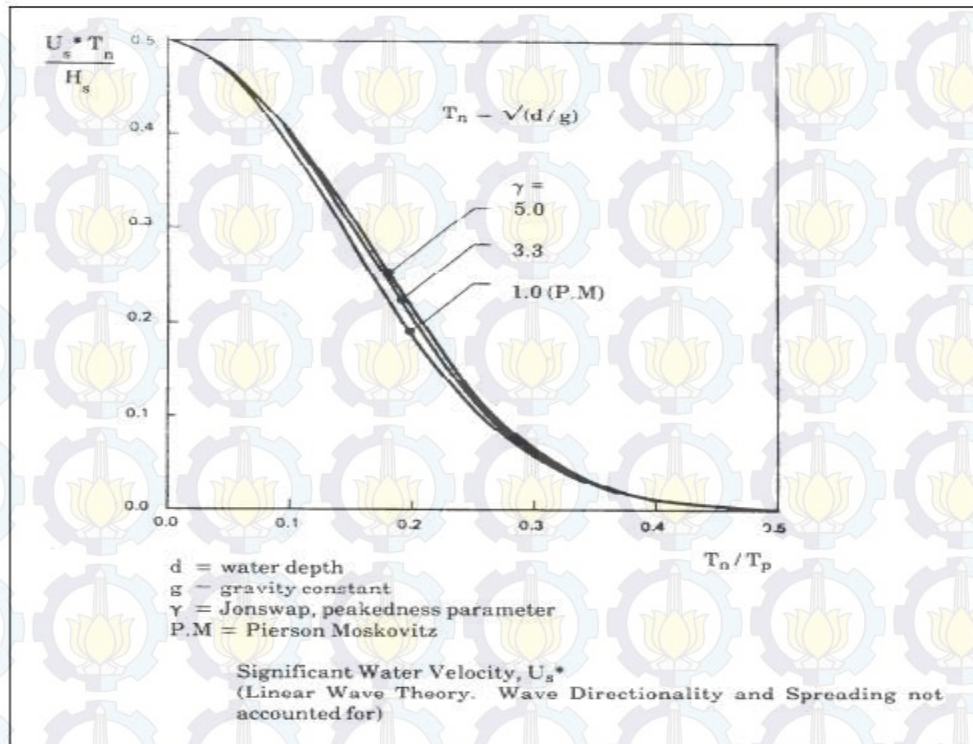
U_m = kecepatan maksimum partikel pada seabed

T_w = periode gelombang

D = Diameter pipa

2.4.6 Parameter Lingkungan

Mendefinisikan parameter *sea - state* H_s dan T_p , dimana digunakan untuk mengkalkulasikan kecepatan perpendicular gelombang signifikan terhadap pipa (U_s)



Gambar 2.8 Determinasi dari kecepatan gelombang signifikan (DNV RP E 305, 1998)

T_n dan T_p dapat dideterminasikan sebagai berikut :

$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}} \text{ dan } T_p = \sqrt{250 H_s g} \quad \text{pers. 27}$$

Dari gambar 2.6 $(U_s * T_n) / H_s$ dapat dideterminasikan untuk T_n / T_p . Maka, kecepatan gelombang signifikan *perpendiculari* dapat dicari.

Tabel 2.6 Grain size untuk seabed material (DNV RP E 305)

Seabed	Grain Size d50 (mm)	Roughness z ₀ (m)
Silt	0.0625	5.21E-06
Very Fine Sand	0.125	1.04E-05
Fine Sand	0.25	2.08E-05
Medium Sand	0.5	4.17E-05
Coarse Sand	1	8.33E-05
Very Coarse Sand	2	1.67E-04
Gravel	4	3.33E-04
Pebble	10	8.33E-04
	25	2.08E-03
	50	4.17E-03
Cobble	100	8.33E-03
	250	2.08E-02
Boulder	500	4.17E-02

Grain size (d50) dan kekerasan seabed (Zo) dideterminasikan pada tabel 2.6

$$U_{avg} = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_o} + 1\right)} \left[\left(1 + \frac{z_o}{D}\right) \ln\left(1 + \frac{D}{z_o}\right) - 1 \right] \quad \text{pers. 28}$$

dimana :

$$U_{avg} = U_D / U_r$$

U_r = Kecepatan arus pada ketinggian tertentu

z_r = Refrensi ketinggian untuk kecepatan arus

z_o = Parameter kekerasan tanah pada seabed

d50 = Grain size

$$\text{Rasio arus terhadap kecepatan gelombang } M = U_D / U_s \quad \text{Pers. 29}$$

$$\text{Keulegan Carpenter Number } K = (U_s T_p) / D \quad \text{Pers. 30}$$

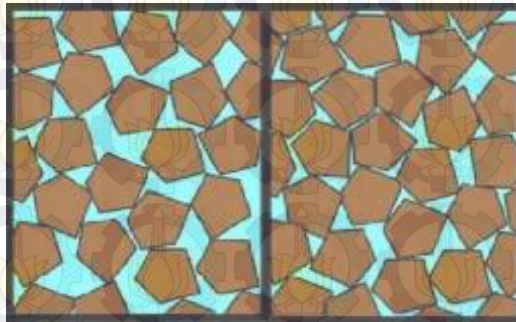
2.5 Soil Liquefaction

Soil liquefaction adalah fenomena dimana massa tanah hilang dalam presentase yang sangat besar pada tahanan gesernya akibat beban monotonik, siklik, maupun beban kejut dimana beban tersebut mengalir seperti cairan hingga tegangan geser partikel tersebut rendah seperti berkurangnya daya dukung geser yang dimilikinya (Sladen et al, 1985).

Secara umum, *soil liquefaction* hanya terjadi apabila suatu tanah memenuhi syarat – syarat tertentu. Jadi apabila tanah tersebut tidak memenuhi syarat tersebut, maka tanah tersebut tidak berpotensi untuk terjadi *soil liquefaction*. Maka dari itu, agar tidak terjadi *soil liquefaction*, perencanaan pembangunan harus menghindari tanah – tanah yang telah memenuhi syarat terjadinya *soil liquefaction*. *Soil liquefaction* biasanya terjadi pada tanah atau lahan yang tidak terlalu padat. Misalnya tanah yang terbentuk dari pasir atau endapan bekas delta sungai. Tanah semacam ini cenderung tidak padat sehingga memiliki rongga yang banyak.

Agar lebih mudah memahami proses terjadinya *soil liquefaction*, maka kita perlu untuk memahami terlebih dahulu bahwa suatu endapan tanah terdiri dari

partikel-partikel. Setiap partikel memiliki kontak dengan partikel lain, hal tersebut dapat kita lihat pada (Gambar 2.7). Jika kita perhatikan setiap partikel tersebut posisinya saling berdekatan sehingga mempunyai kontak dengan partikel lainnya. Dengan adanya kontak antar partikel tersebut, suatu tanah akan menjadi memiliki suatu kekuatan untuk memikul beban yang ada di dalam atau di atasnya, karena pada kondisi seperti ini menjadikan beban yang berada di atas tanah tersebut akan dipikul/ditopang secara bersamaan oleh seluruh partikel. Dan pada akhirnya beban dari bangunan yang ada di atasnya tersebut disalurkan ke lapisan batuan dasar di bagian bawah lapisan tanah tersebut.



Gambar 2.9 Kondisi partikel tanah saat mengalami getaran. (Saat terjadinya tegangan air pori) (Yu et al. 2001)

Pada kondisi seperti pada gambar di atas, sebagian besar beban dipikul oleh air, sehingga pemikulan beban tersebut menjadi tidak stabil. Hal tersebut dapat terjadi juga pada beban dari gedung pada tanah yang mengalami *soil liquefaction*, maka gedung tersebut dapat berakibat tenggelam ke dalam tanah. Dalam suatu kejadian yang lebih ekstrim lagi, tekanan air pori dapat menjadi sangat tinggi sehingga lebih banyak lagi partikel yang terdorong sehingga tidak ada lagi yang berhubungan. Dalam kasus-kasus yang demikian, kekuatan tanah itu akan menjadi sangat kecil dan akan bertindak lebih seperti suatu zat cair dibanding suatu padat.

2.5.1 Metode Untuk Mengevaluasi Terjadinya *Soil Liquefaction*

a. Menentukan tegangan geser siklis dari partikel tanah

CSR (*Cyclic Stress Ratio*) merupakan nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang diakibatkan oleh gelombang dengan tegangan vertikal efektif di tiap lapisan. Nilai CSR (*Cyclic Stress Ratio*) pada suatu lapisan tanah sangat

dipengaruhi oleh nilai kekuatan dan jenis tanah. Izhihara dan Yamasaki (1984) menentukan nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) dengan persamaan sebagai berikut :

$$CSR = \frac{\sigma_v}{\sigma_{v'}} = 0.0019 \cdot D_r \cdot \frac{1+2K_0}{3} \quad \text{Pers. 31}$$

Dengan :

D_r : Relative density

K_0 : Koefisien tekanan tanah

Adapun tabel nilai koefisien tekanan tanah (K_0) menurut Pruska (1973) ialah sebagai berikut :

Tabel 2.7 Nilai koefisien tekanan tanah (K_0)

No.	Soil Type	K_0
1	Dense Sand	0.35
2	Loose Sand	0.6
3	Normally Consolidated Clays	0.5
4	Lightly Overconcolidated Clays	1.0
5	Heavily Overconcolidated Clays	3.0

Cyclic Ressistance Ratio (CRR) yang merupakan ketahanan tanah untuk menahan *soil liquefaction*. Nilai CRR menurut Izhihara dan Yamasaki (1984) ialah :

$$CRR = \frac{\pi \frac{\rho_w}{\rho'} \cdot \frac{H_0}{L_0}}{\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \cdot \sqrt{\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \cdot \left(1 + \frac{4\pi/L}{\sinh(4\pi/L)}\right)}} \quad \text{pers. 32}$$

Dengan :

ρ_w : Massa jenis air laut

ρ' : Massa jenis tanah

H_0 : Tinggi gelombang di perairan dalam

L_0 : Panjang gelombang di perairan dalam

h : Kedalaman perairan

L : Panjang Gelombang

b. Menentukan *Safety Factor* (SF)

Pada analisa *soil liquefaction*, *safety factor* dapat ditentukan setelah didapatkan nilai dari CRR dan CSR. Izhihara dan Yamasaki (1984) memberikan formula untuk menentukan nilai SF dengan perbandingan nilai CRR/CSR.

$$SF = (CRR / CSR) \quad \text{Pers.33}$$

2.6 Scouring

Scouring adalah pergerakan dari tanah dasar laut yang disebabkan arus dan gelombang dimana prosesnya sama dengan erosi (Kinsman, 1965). *Scouring* merupakan fenomena alam yang disebabkan oleh aliran air laut. Peristiwa ini terjadi pada material lumpur atau endapan, namun dapat juga terjadi pada batu dan karang dengan kondisi tertentu. Sedangkan menurut Halliwell (1986) dalam *An Introduction To Offshore Pipelines*, *scouring* adalah proses penggerusan atau pengikisan tanah di bawah struktur silinder bawah laut (pipa atau kabel) akibat fluktuasi tekanan dan kecepatan aliran fluida.

Scouring akan menyebabkan penurunan kapasitas tahanan pondasi yaitu tahanan pasif tanah terhadap gaya lateral dan momen. Gerusan yang terjadi dapat digolongkan sebagai berikut:

- Gerusan Umum
Gerusan yang terjadi akibat proses alami.
- Gerusan akibat penyempitan alur (*Contraction Scouring*)
Gerusan yang terjadi akibat adanya penyempitan arus.
- Gerusan lokal
Gerusan ini pada umumnya terjadi akibat adanya bangunan air.

Ada 2 macam gerusan local, yaitu :

- *Clear Water Scouring*

Clear water Scouring terjadi pada kondisi dimana tidak ada material atau sedimen yang ikut terangkat (transport sedimen) oleh aliran air. Pada kondisi *clear water scouring* nilai $\theta < \theta_{cri}$ dimana θ untuk *shield parameter*.

- *Live Bed Scouring*

Live bed scouring terjadi pada kondisi dimana material atau sedimen yang berada di *seabed* ikut terangkut oleh aliran air. Pada kondisi ini nilai $> \theta_{cri}$.

Variabel – variabel yang berpengaruh terhadap gerusan lokal meliputi :

1. Kondisi fluida, yaitu :

- Kerapatan (ρ)
- Gravitasi (g)
- Kecepatan (U)
- Kedalaman aliran (d_θ)

2. Kondisi dasar, yaitu :

- Diameter butiran sedimen (D_s)
- Kerapatan massa (ρ_s)

3. Factor geometric, yaitu :

- Tebal (b)
- Panjang (L)
- Sudut arah aliran (α)
- Jarak (α)

2.6.1 Berat Vertikal Air

Berat vertikal air atau biasa dikenal sebagai tekanan hidrostatik adalah tekanan yang terjadi di bawah air. Tekanan ini terjadi karena adanya berat air yang membuat cairan tersebut mengeluarkan tekanan. Tekanan sebuah cairan bergantung pada kedalaman cairan di dalam sebuah ruang dan gravitasi juga menentukan tekanan air tersebut. Hubungan ini dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad \text{Pers. 34}$$

dimana ρ adalah masa jenis cairan, g (9,81 m/s) adalah gravitasi, dan h adalah kedalaman. h dihitung dari permukaan air menuju ke kedalaman benda.

2.6.2 Stabilitas Tanah

Kekuatan geser tanah (soil shear strength) dapat didefinisikan sebagai kemampuan maksimum tanah untuk bertahan terhadap usaha perubahan bentuk pada kondisi tekanan (pressure) dan kelembapan tertentu. Kekuatan geser tanah dapat diukur di lapangan maupun di laboratorium. Pengukuran di lapangan antara lain menggunakan vane-shear, plate load, dan test penetrasi. Pengukuran di laboratorium meliputi penggunaan miniatur vane shear, direct shear, triaxial compression, dan unconfined compression dan fall-cone soil shear strength.

Data kekuatan geser tanah, pada awalnya hanya digunakan untuk keperluan teknik bangunan dalam mengevaluasi kemampuan tanah menopang konstruksi bangunan, seperti gedung dan bendungan.

2.6.3 Konsep Kekuatan Geser tanah

Coulomb pada tahun 1776 memperkenalkan teori geser maksimum, yaitu bahwa keruntuhan, nilai tekanan pada saat terjadinya perubahan bentuk tetap, terjadi jika tekanan geser yang diberikan mencapai nilai kritis dari kemampuan tanah. Teori ini kemudian disempurnakan oleh Mohr, sehingga kemudian dikenal dengan hukum Mohr-Coulomb. Hukum Mohr-Coulomb menyatakan bahwa kekuatan geser tanah, τ , mempunyai hubungan fungsional dengan kohesi tanah, c , dan friksi antar partikel yang dikemukakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad \text{Pers. 35}$$

dimana:

τ = kekuatan geser (kPa) yang dibutuhkan sehingga keruntuhan terjadi

c = adalah kohesi tanah (kPa)

σ_n = adalah tekanan normal (normal stress; kPa) tegak lurus bidang

ϕ = sudut friksi internal partikel (derajat).

Dari persamaan tersebut dapat dikemukakan bahwa τ akan sama dengan c jika tidak ada tekanan normal (normal stress, σ_n) yang diaplikasikan terhadap bidang keruntuhan. Pada tanah yang tidak kohesif seperti pasir, maka nilai τ akan

sama dengan nilai σ_n . Percikan partikel tanah dan kekuatan tanah dapat didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S = a + b KE/\tau \quad (2) \quad \text{pers. 36}$$

dimana :

S = percikan partikel tanah (mg drop-1)

KE = energi kinetik (J drop-1);

τ = kekuatan geser tanah

a/b = konstanta

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa erosi ditentukan oleh kekuatan geser tanah. setelah mengetahui berapa besaran dari nilai stabilitas tanah langkah selanjutnya adalah perhitungan nilai *Scouring*.

Formula untuk menghitung kedalaman scouring pada pipa bawah laut memiliki variasi dimana tiap variasi digunakan tergantung pada penyebab dari scouring tersebut. Sumer & Fredsoe (2002) dalam bukunya yang berjudul *The Mechanics of Scour in the Marine Environment* membagi formula kedalaman scouring menjadi beberapa jenis yaitu :

2.6.4 Perhitungan Kedalaman *Scouring*

Formula untuk menghitung kedalaman scouring pada pipa bawah laut memiliki variasi dimana tiap variasi digunakan tergantung pada penyebab dari scouring tersebut. Sumer & Fredsoe (1990) dalam bukunya yang berjudul *The Mechanics of Scour in the Marine Environment* membagi formula kedalaman scouring menjadi beberapa jenis yaitu :

2.6.4.1 Kedalaman *Scouring* akibat arus

Banyak ahli secara ekstensif mempelajari kedalaman scouring pada steady currents. Kjeldsen (1973) adalah orang yang pertama kali menemukan formula hubungan empirik antara kedalaman scouring S , diameter pipa D , dan kecepatan arus efektif yang bekerja pada pipa V .

$$ds_{\text{curr}} = SF \times 1 \times D^{0.8} \times \frac{u^{0.4}}{1.8} \quad \text{Pers. 37}$$

Dimana :

ds_{curr} = Kedalaman scouring (m)

U = Kecepatan arus efektif yang bekerja pada pipa (m/s)

D = Diameter pipa (m)

SF = Safety factor

Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung nilai kedalaman *scouring* oleh pengaruh arus.

2.6.4.2 Kedalaman *scouring* akibat pengaruh gelombang

Faktor gelombang juga menjadi salah satu parameter dalam perhitungan estimasi kedalaman *scouring*. Sebagaimana telah dirunuskan oleh Summer and Fredsoe (1990) sebagai berikut :

$$ds_{wave} = 0,1 \times SF \times KC^{0,5} \times D \quad \text{Pers. 38}$$

Dimana :

ds_{wave} = Kedalaman *scouring* (m)

KC = keulegan – carpenter number

D = Diameter pipa (m)

SF = Safety factor

$$KC = \frac{U_m \times T_p}{D} \quad \text{Pers. 39}$$

Dimana :

U_m = Kecepatan maksimum partikel di *seabed* (m/s)

D = Diameter Pipa

T_p = Periode gelombang (s)

2.6.4.3 Kedalaman *scouring* akibat arus dan gelombang

Analisa kedalaman lubang *scour* yang dilakukan agar mendekati kondisi sesungguhnya harus memperhitungkan semua parameter baik arus maupun gelombang.

Berikut adalah formula perhitungan perkiraan kedalaman *scouring* akibat beban arus dan gelombang.

$$ds_{\text{curr+waves}} = \left(\frac{U}{U_{\text{cr}}} \right)^{0,5} \times ds_{\text{wave}} \quad \text{Pers. 40}$$

Dimana :

ds_{wave} = Kedalaman *scouring* (m)

U = Kecepatan arus (m/s)

U_{cr} = Critical velocity (m/s)

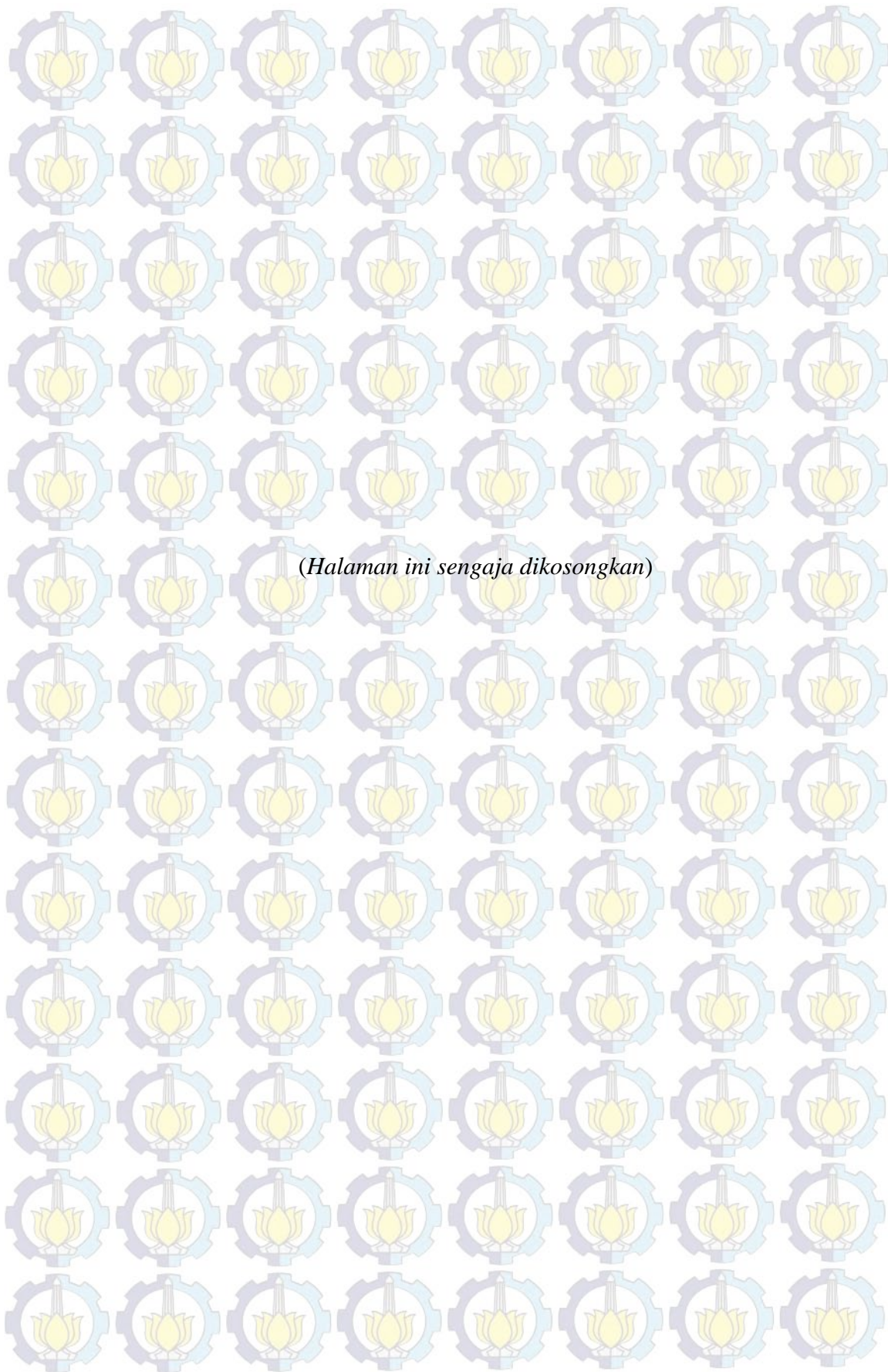
SF = Safety factor

2.6.5 Lebar Scouring

Sumer and Fredsoe (1990) telah mempelajari lebar span yang terjadi akibat *scouring*, dari percobaanya tersebut didapat formula empiric sebagai berikut

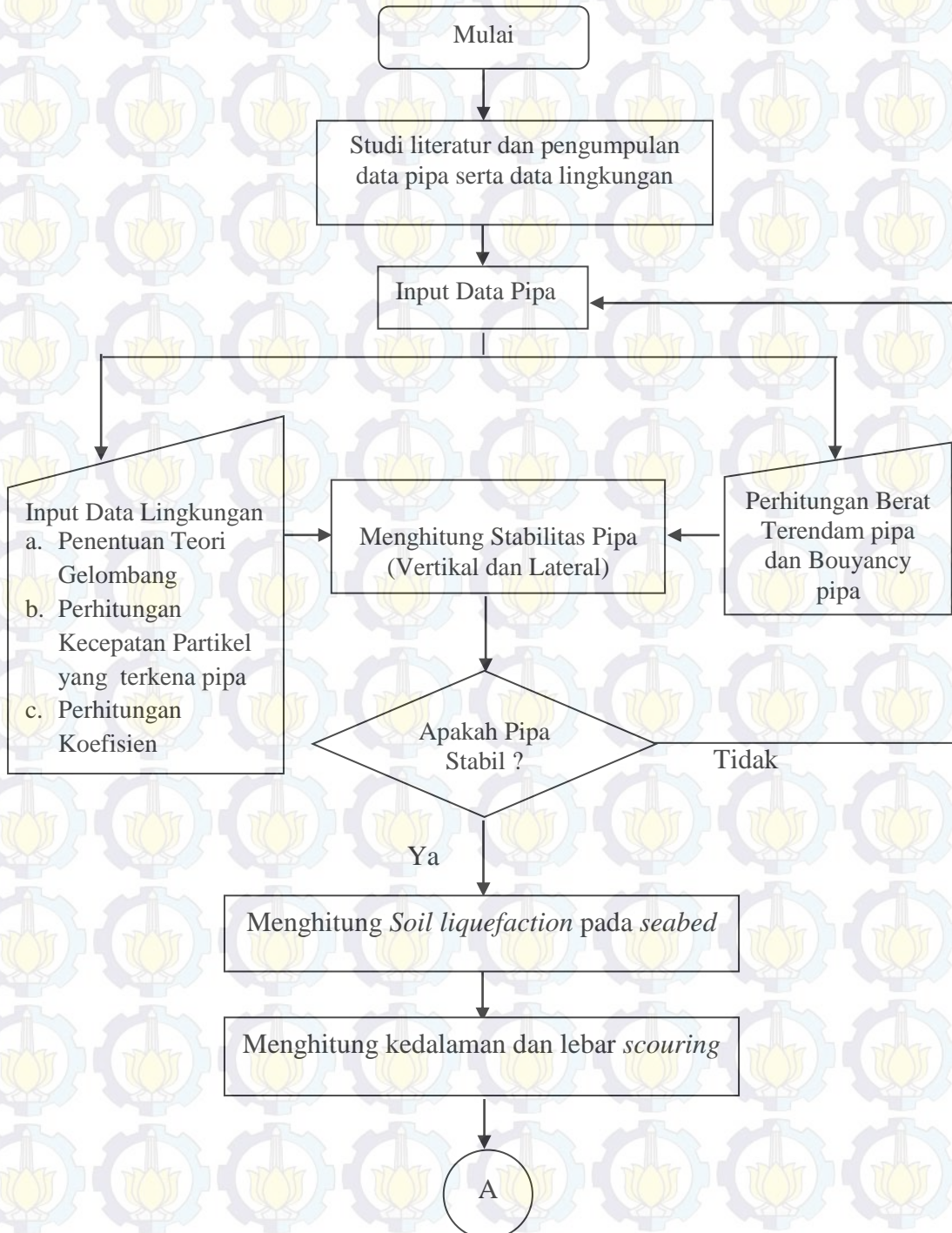
$$\frac{W}{D} = 0,35KC^{0,65} \quad \text{Pers. 41}$$

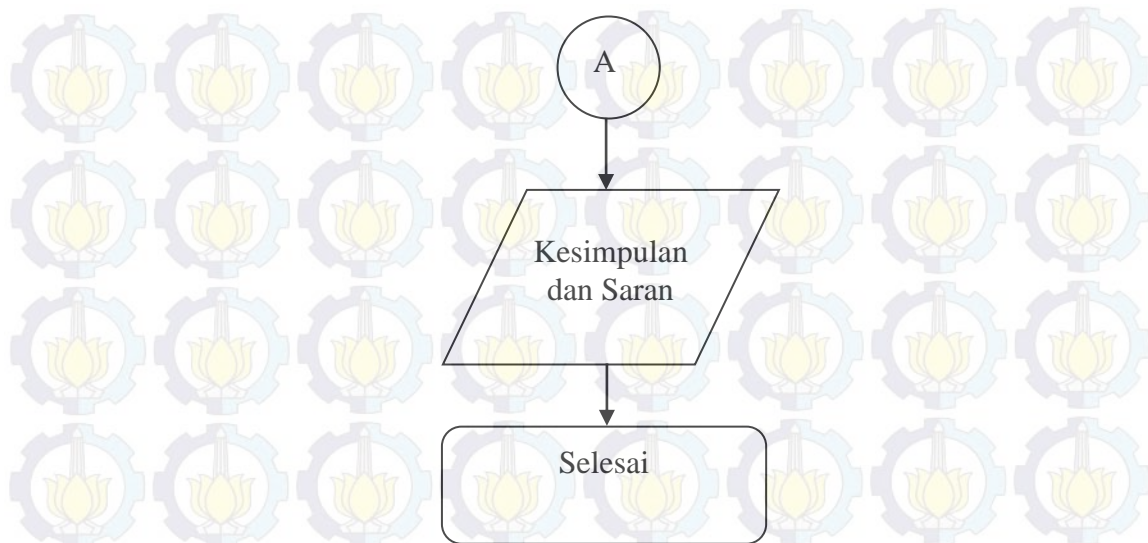
Dimana W adalah lebar yang dihitung dari tengah pipa sampai akhir lubang *scour*



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian tugas akhir

3.2 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data

Pipa bawah laut yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah pipa adalah milik Petronas Carigali Ketapang II Ltd yang menghubungkan *Well Head Platform* (WHP) di kawasan ladang minyak Bukit Tua, Jawa Timur dengan *Onshore Receiving Facilities* (ORF) di Gresik. Berikut adalah data pipa dan data lingkungan yang akan digunakan.

2. Perhitungan Berat Pipa

Analisa ini dilakukan untuk mengetahui berat pipa baik pada saat di udara, berat tercelup pipa dan *bouyancy* pipa pada saat berada dalam air

3. Perhitungan Stabilitas Pipa

Dalam menganalisa stabilitas pipa bawah laut perlu dilakukan analisa kestabilan pipa pada *seabed*, mengingat bahwa pipa akan mengalami gaya-gaya hidrodinamis yang dapat merubah letak dan posisi pipa tersebut, dan akibatnya akan fatal, terutama dalam kondisi *crossing*.

Perhitungan stabilitas pipa ini secara vertikal dengan tujuan untuk menilai kecenderungan pipa untuk mengapung atau tenggelam dan secara lateral karena perlakuan pembebanan-pembebanan lingkungan.

4. Perhitungan *soil liquefaction*

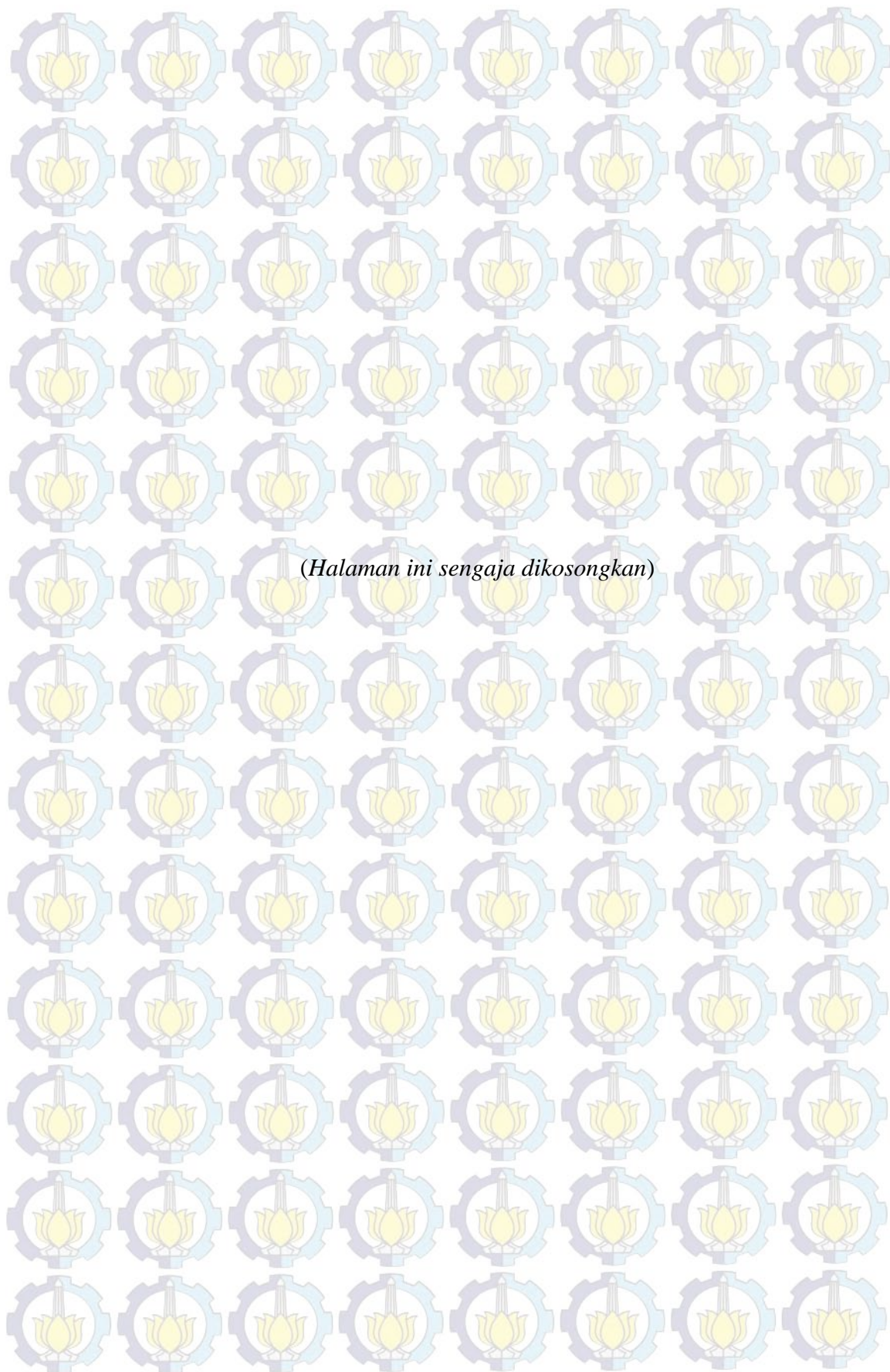
Perhitungan ini dilakukan untuk menemukan di kilometer point berapa tanah mengalami berpotensi mengalami *liquefaction* yang dapat menimbulkan *scouring* (gerusan lokal).

5. Analisa kedalaman dan lebar *scouring*

Analisa ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar dan seberapa dalam lubang yang terjadi akibat penggerusan (*scouring*) pada pipa bawah laut. *Scouring* pada pipa bawah laut bisa mengakibatkan bentangan bebas (*free span*) yang bisa mengakibatkan defleksi pada pipa.

6. Kesimpulan & Saran

Dari seluruh analisa dapat ditarik kesimpulan yang dapat bermanfaat serta saran-saran untuk penelitian berikutnya.



BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengumpulan Data

Studi kasus yang dipakai dalam penelitian ini adalah proyek gas expansion Bukit Tua Development Project Ketapang PSC, Jawa Timur yang menghubungkan *Well Head Platform* (WHP) di kawasan ladang minyak Bukit Tua, Jawa Timur dengan *Onshore Receiving Facilities* (ORF) di Gresik. Adapun jalur pipa pada Bukit Tua Development Project Ketapang PSC. Tugas akhir ini akan menganalisa perihal *scouring* yang terjadi pada dasar laut di bawah pipa milik Petronas Carigali Ketapang II Ltd. Berdasarkan kondisi tanah dan kondisi lingkungan perairan dibawah *pipeline* milik petronas, Ada kemungkinan terjadinya *scouring* yang mengenai tanah dimana pipa diletakkan. Data pipa dan data lingkungan dapat dilihat pada tabel-tabel penyajian di bawah ini.

4.1.1 Data Pipa

Data pipa mengenai jenis material dan dimensi pipa mengambil data dari desain pipa gas milik PT. Petronas Carigali Ketapang II Ltd. yang meliputi diameter, ketebalan, material, korosi yang diijinkan, modulus elastisitas, angka poison dan densitas pipa. Data *external corrosion coating* pipa yang terdiri dari tipe material, densitas dan ketebalannya. Juga terdapat data panjang pipa yang menyalurkan gas dari *platform* di perairan laut jawa di utara pulau Madura sampai ke ORF (*onshore receiving facilities*) di Gresik.

➤ Pipeline properties

Tabel 4.1 Pipeline Properties

Pipeline Properties		
Parameter	Unit	12" Gas Export Pipeline
Nominal Outer Diameter	inch	12
	mm	304.8

Pipeline Properties			
Wall Thickness	KP 0.0 – KP 0.50	mm	10.3
	KP 0.50 – KP 101.20	mm	9.5
	KP 101.20 – KP 110.394	mm	10.3
Material Type		-	CS Rigid
Material Grade		-	API 5L X65
Internal Corrosion Allowance		mm	3.0
Design Pressure		MPag	10
		psig	1450
Max. Operating Pressure		MPag	7
		psig	1015
Max. Design Temperature		°C	94
Max. Operating Temperature		°C	78
Nominal Length		km	110

4.1.2 Data Lingkungan

Data lingkungan ini berupa data pasang surut, data gelombang, kecepatan arus, kedalaman laut dan data tanah bawah laut.

➤ Data Pasang Surut

Tabel 4.2 *Tidal Range*

Tidal Range			
Description	Units	KP 0 – KP 82	KP 82 – KP 109
Highest Astronomical Tide (HAT)	M	1.20	0.90
Mean Sea Level (MSL)	M	0.00	0.00
Lowest Astronomical Tide (LAT)	M	-1.40	-1.00

➤ Data Kecepatan Arus

Tabel 4.3 *Directional Current Velocity Data*

Directional Current Velocity Data				
Water Column	Units	Current Speed		
		1-year RP	10-year RP	100-year RP
Surface	m/s	1.15	1.50	2.00
Mid Depth	m/s	0.90	1.20	1.65
8m Above seabed	m/s	0.65	0.90	1.30

➤ Data Lingkungan di Sekitar Pipa

Tabel 4.4 *Directional Enviromental Data Along Pipeline Route (1)*

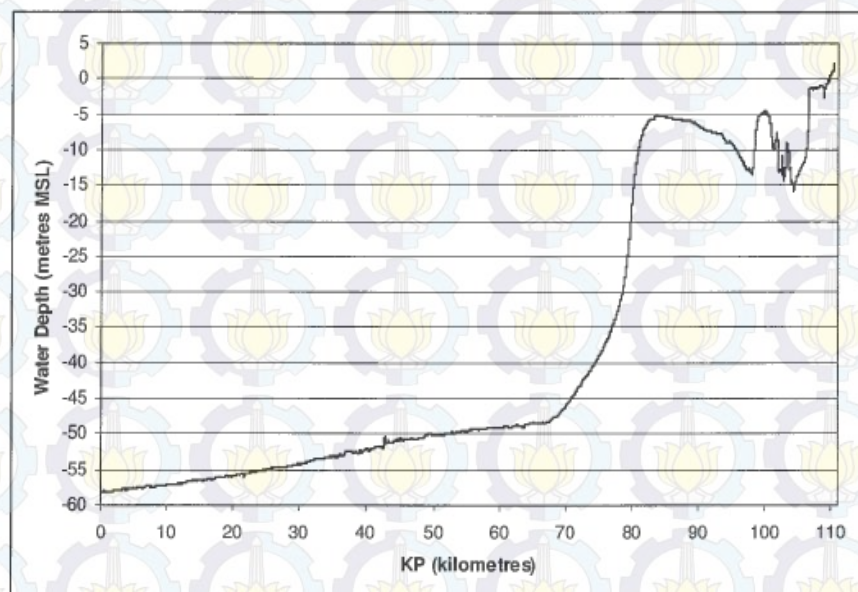
Directional Enviromental Data Along Pipeline Route					
Description	Units	KP 0 – KP 85		KP 85 – KP 95	
		1-year RP	100-year RP	1-year RP	100-year RP
Significant Wave Height	m	2.6	3.2	2.13	2.1
Peak Wave Period	s	7.4	8.3	7.72	10.13
Max. Wave Height	m	5.6	8.2	3.97	3.89
Significant Wave Period	s	7.3	8.6	6.91	8.2
Current at 1m Above Seabed	m/s	0.48	0.85	0.49	0.46

Tabel 4.5 *Directional Enviromental Data Along Pipeline Route (2)*

Directional Enviromental Data Along Pipeline Route					
Description	Units	KP 95 – KP 106		KP 106 – KP 110	
		1-year RP	100-year RP	1-year RP	100-year RP
Significant Wave Height	m	1.34	1.50	0.78	0.90
Peak Wave Period	S	7.72	10.13	7.72	10.13
Max. Wave Height	m	2.49	2.79	1.45	1.68
Significant Wave Period	S	6.44	7.76	5.88	7.13
Current at 1m Above Seabed	m/s	0.59	0.51	0.75	0.63

➤ Data Kedalaman Air

Tabel 4.6 *Water Depth*



➤ Data Properti Air laut

Tabel 4.7 *Sea Water Properties*

Sea Water Properties		
Description	Units	Parameter
Density	kg/m ³	1025
Kinematics Viscosity	m ² /s	0.96x10 ⁻⁶ (At 25°C) 0.85x10 ⁻⁶ (At 35°C)
Heat Capacity	J/kg.K	4018
Thermal Conductivity	W/m.K	0.612
Min. Sea Water Temperature	°C	26.0
Max. Sea Water Temperature	°C	30.0

➤ Data Tanah

Tabel 4.8 *Sea Bed Soil Properties*

Sea Bed Soil Properties		
Description	Units	Parameter
Soil Type Dominant	-	Soft Clay
Undrained Shear Strenght	Psi	0.55
Specific Gravity	-	2.61
Grain Size (d50)	-	0.0625
Axial Coefficient of Friction	-	0.5
Lateral Coefficeient of Friction	-	0.3
Seabed Resistivity	Ohm.cm	150
Relative Density (D _r)	-	27%
Coeff. of Earth Pressure (K ₀)	-	0.5

4.2 Stabilitas Pipa

Prosedur perhitungan pada pipa bawah laut digunakan dengan standart DNV RP E305 *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Analisis dilakukan pada 3 kondisi kedalaman relatif (d/L), yaitu kondisi perairan dangkal, perairan transisi dan perairan dalam. Berdasarkan data lingkungan tempat meletaknya pipa bawah laut yang menghubungkan antara fasilitas produksi di Bukit Tua field North Madura dengan ORF di gresik, konfigurasi kedalaman relatifnya adalah :

Tabel 4.9 Konfigurasi kedalaman relatif

d/L	Kedalaman
Laut dangkal	0 – 4 m
Laut transisi	5 – 35 m
Laut dalam	36 – 60 m

Analisa stabilitas pipa pada laut transisi dilakukan pada kedalaman 30 m dan pada laut dalam dilakukan pada kedalaman 40 m. Analisa stabilitas pipa pada laut dangkal tidak dilakukan karena pada kedalaman perairan tersebut pipa tidak meletak diatas *seabed* namun tertanam sebagaimana sesuai peraturan pemerintah yang mengharuskan pipa bawah laut yang berada di kedalaman perairan kurang dari 13m harus tertanam sedalam 3m agar tidak mengganggu alur pelayaran.

4.2.1 Analisa Stabilitas Vertikal

Analisa stabilitas vertical dilakukan untuk mengetahui apakah dalam prakteknya pipa yang memiliki berat tertentu ketika dipasang mampu untuk melawan gaya apung ketika tercelup air. Dalam perhitungan stabilitas pipa secara vertikal, terdapat tiga hal yang harus terlebih dahulu diketahui nilainya, yaitu nilai hasil perhitungan berat pipa di udara, hasil perhitungan *buoyancy* pipa ketika tercelup air dan berat pipa tercelup, yaitu selisih antara berat pipa di udara dengan *buoyancy* pipa. Selain itu terdapat ketentuan stabilitas pipa secara vertikal yang memenuhi berdasarkan standart DNV RP E305 seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.1 berikut.

$$SF_v = \frac{W_s + B}{B} \geq 1.1 \quad \text{Pers. 42}$$

Dari analisa yang dilakukan pada kondisi pada kondisi pipa baik yang terletak di perairan transisi ataupun perairan dalam diperoleh hasil sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4.10 Hasil analisa stabilitas vertikal pipa

Kondisi	Stabilitas Vertikal Pipa		
	W_s	B	Check
	N/m	N/m	$SF_v \geq 1.1$
Laut Transisi	1014.6	1169.9	1.86
Laut Dalam	1014.6	1169.9	1.86

4.2.2 Analisa Stabilitas Lateral

Analisa stabilitas lateral dilakukan untuk mengetahui besar gaya yang dimiliki oleh pipa untuk melawan gaya – gaya hidrodinamis yang mengenai pipa. Gaya – gaya hidrodinamis seperti gaya geser, gaya angkat dan gaya inertia yang bekerja pada pipa tersebut diasumsikan bekerja secara tegak lurus terhadap pipa dengan dilawan oleh gaya normal dan gesekan pipa dengan media *seabed*. Sedangkan kriteria penerimaan stabilitas pipa secara lateral ditunjukkan oleh persamaan 43 berikut.

$$SF_l = \frac{(W_s - F_L)\mu}{F_D + F_I} \geq 1.1 \quad \text{Pers. 43}$$

Dari analisa yang dilakukan pada perairan transisi dan perairan dalam diperoleh nilai – nilai sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Hasil analisa stabilitas lateral pipa

Kondisi	Gaya Hidrodinamis					Check
	F_D (N/m)	F_I (N/m)	F_L (N/m)	W_s	μ	$SF_L \geq 1.1$
Laut transisi	18.89	100.05	21.80	1014.6	0.7	5.84
Laut dalam	59.83	73.69	69.03	1014.6	0.7	4.95

4.3 Soil Liquefaction

Analisa *soil liquefaction* dilakukan karena *seabed* menerima beban secara terus menerus dari pergerakan air di atasnya (*porewater pressure*) sehingga partikel – partikel tanah menyebar dan mengakibatkan tanah kehilangan massanya. Analisa *soil liquefaction* dilakukan sebatas pada penilaian di titik mana saja yang berpotensi terjadi *liquefaction* dengan membandingkan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) . Adapun hasil dari perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$CSR = \frac{\sigma_v}{\sigma_{v'}} = 0.0019 \cdot D_r \cdot \frac{1+2K_0}{3} \quad \text{Pers. 44}$$

$$CRR = \frac{\pi \frac{\rho_w}{\rho'} \cdot \frac{H_0}{L_0}}{\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \cdot \sqrt{\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \cdot \left(1 + \frac{4\pi/L}{\sinh(4\pi/L)}\right)}} \quad \text{Pers. 45}$$

Dikatakan terjadi *soil liquefaction* apabila nilai $CRR / CSR < 1$

Tabel 4.12 Hasil analisa *soil liquefaction*

KP	h	$\frac{H_0}{L_0}$	D_r	K_0	Csr	L	ρ_w	ρ'	Crr	$\frac{Crr}{Csr}$	Liq ?
1	58	0.003	27	0.5	0.034	610.22	1025	900	0.016	0.473	Yes
2	58	0.003	27	0.5	0.034	610.22	1025	900	0.016	0.473	Yes
3	58	0.003	27	0.5	0.034	610.22	1025	900	0.016	0.473	Yes
4	58	0.003	27	0.5	0.034	610.22	1025	900	0.016	0.473	Yes
5	58	0.003	27	0.5	0.034	610.22	1025	900	0.016	0.473	Yes
6	58	0.003	27	0.5	0.034	610.22	1025	900	0.016	0.473	Yes
7	58	0.003	27	0.5	0.034	610.22	1025	900	0.016	0.473	Yes
8	57	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.016	0.479	Yes
9	57	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.016	0.479	Yes
10	57	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.016	0.479	Yes
11	57	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.016	0.479	Yes
12	57	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.016	0.479	Yes
13	57	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.016	0.479	Yes
14	56	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.491	Yes
15	56	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.491	Yes
16	56	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.491	Yes
17	56	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.491	Yes
18	56	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.491	Yes

KP	h	$\frac{H_0}{L_0}$	D_r	K_0	Csr	L	ρ_w	ρ'	Crr	$\frac{Crr}{Csr}$	Liq ?
19	56	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.491	Yes
20	56	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.491	Yes
21	55	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.504	Yes
22	55	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.504	Yes
23	55	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.504	Yes
24	55	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.504	Yes
25	55	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.504	Yes
26	55	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.017	0.504	Yes
27	54	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.517	Yes
28	54	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.517	Yes
29	54	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.517	Yes
30	54	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.517	Yes
31	54	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.517	Yes
32	53	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.531	Yes
33	53	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.531	Yes
34	53	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.531	Yes
35	53	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.018	0.531	Yes
36	52	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.019	0.546	Yes
37	52	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.019	0.546	Yes
38	52	0.003	27	0.5	0.034	604.86	1025	900	0.019	0.546	Yes
39	51	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.517	Yes
40	51	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.517	Yes
41	51	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.517	Yes
42	51	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.517	Yes
43	51	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.517	Yes
44	51	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.517	Yes
45	51	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.517	Yes
46	51	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.517	Yes
47	50	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.532	Yes
48	50	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.532	Yes
49	50	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.532	Yes
50	50	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.532	Yes
51	50	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.532	Yes
52	50	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.532	Yes
53	50	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.532	Yes
54	50	0.003	27	0.5	0.034	571.26	1025	900	0.018	0.532	Yes
55	49	0.003	27	0.5	0.034	565.34	1025	900	0.018	0.540	Yes
56	49	0.003	27	0.5	0.034	565.34	1025	900	0.018	0.540	Yes
57	49	0.003	27	0.5	0.034	565.34	1025	900	0.018	0.540	Yes

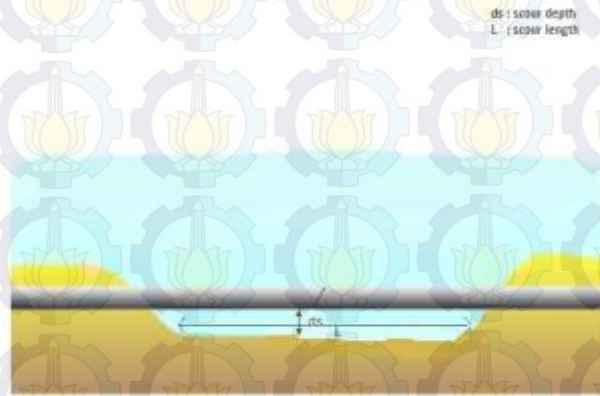
KP	h	$\frac{H_0}{L_0}$	D_r	K_0	Csr	L	ρ_w	ρ'	Crr	$\frac{Crr}{Csr}$	Liq ?
58	49	0.003	27	0.5	0.034	565.34	1025	900	0.018	0.540	Yes
59	49	0.003	27	0.5	0.034	565.34	1025	900	0.018	0.540	Yes
60	49	0.003	27	0.5	0.034	565.34	1025	900	0.018	0.540	Yes
61	49	0.003	27	0.5	0.034	565.34	1025	900	0.018	0.540	Yes
62	48	0.003	27	0.5	0.034	559.30	1025	900	0.019	0.547	Yes
63	48	0.003	27	0.5	0.034	559.30	1025	900	0.019	0.547	Yes
64	48	0.003	27	0.5	0.034	559.30	1025	900	0.019	0.547	Yes
65	48	0.003	27	0.5	0.034	559.30	1025	900	0.019	0.547	Yes
66	48	0.003	27	0.5	0.034	559.30	1025	900	0.019	0.547	Yes
67	48	0.003	27	0.5	0.034	559.30	1025	900	0.019	0.547	Yes
68	48	0.003	27	0.5	0.034	559.30	1025	900	0.019	0.547	Yes
69	48	0.003	27	0.5	0.034	559.30	1025	900	0.019	0.547	Yes
70	45	0.003	27	0.5	0.034	540.73	1025	900	0.020	0.572	Yes
71	43	0.003	27	0.5	0.034	534.35	1025	900	0.021	0.600	Yes
72	42	0.003	27	0.5	0.034	527.86	1025	900	0.021	0.610	Yes
73	41	0.003	27	0.5	0.034	521.25	1025	900	0.021	0.620	Yes
74	40	0.003	27	0.5	0.034	514.53	1025	900	0.022	0.631	Yes
75	38	0.003	27	0.5	0.034	500.75	1025	900	0.022	0.653	Yes
76	36	0.002	27	0.5	0.034	455.25	1025	900	0.015	0.444	Yes
77	33	0.002	27	0.5	0.034	448.83	1025	900	0.017	0.493	Yes
78	30	0.002	27	0.5	0.034	435.47	1025	900	0.019	0.542	Yes
79	28	0.002	27	0.5	0.034	414.45	1025	900	0.019	0.558	Yes
80	25	0.002	27	0.5	0.034	392.08	1025	900	0.021	0.606	Yes
81	22	0.002	27	0.5	0.034	367.95	1025	900	0.023	0.666	Yes
82	19	0.002	27	0.5	0.034	341.75	1025	900	0.025	0.741	Yes
83	15	0.002	27	0.5	0.034	302.60	1025	900	0.030	0.877	Yes

Berdasarkan analisa diatas, dapat diambil kesimpulan bahwa sepanjang bentangan pipa bawah laut dari *wellhead platform* (WHP) di Laut Jawa sampai *Onshore Receiving Facility* (ORF) di Gresik berpotensi untuk terjadi *soil liquefaction* karena nilai **CRR / CSR** < 1.

4.4 Analisa Scouring

Dalam analisa *scouring* pada pipa bawah laut dalam penelitian ini meliputi 2 hal, yaitu perhitungan kedalaman *scouring* (*scour depth*) dan perhitungan lebar *scouring* (*scour length*). Adapun yang dimaksud kedalaman *scouring* adalah kedalaman cerukan di bawah pipa bawah laut akibat pergerakan tanah dasar laut

yang disebabkan oleh arus dan gelombang. Sedangkan lebar scouring adalah lebar cerukan di bawah pipa bawah laut akibat pergerakan tanah dasar laut yang disebabkan oleh arus dan gelombang. Untuk lebih jelasnya, perhatikan Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Ilustrasi *scour depth* & *scour length*

Scouring terjadi karena gelombang dan tekanan air laut mengakibatkan butiran sedimen pada *seabed* kehilangan daya lekatnya (merenggang) dan kemudian terbawa oleh arus sehingga terjadi transport sediment dan membentuk sebuah cerukan (*scouring*).

Dalam analisa *scouring* pada tugas akhir ini, dipakai satu data tanah yaitu tanah *soft clay* karena mayoritas tanah yang dilewati oleh *pipeline* berjenis *soft clay* sehingga dapat dianggap mewakili.

4.4.1 Kedalaman *scouring*

Dalam perhitungan kedalaman *scouring* (*scour depth*) digunakan parameter – parameter arus serta gelombang . Oleh karena itu ada 3 parameter perhitungan kedalaman *scouring* yaitu kedalaman scouring akibat erus, kedalaman scouring akibat gelombang dan kedalaman scouring akibat arus dan gelombang.

a) Kedalaman *scouring* akibat arus

Dalam perhitungan kedalaman *scouring* akibat arus ada beberapa faktor yang dipertimbangan seperti *safety factor* (SF), diameter pipa (D), kecepatan arus (U). Adapun persamaan yang dipakai sebagaimana menurut Summer and Fredsoe (1990) :

$$ds_{curr} = SF \times 1 \times D^{0,8} \times \frac{u^{0,4}}{1,8} \quad \text{Pers. 46}$$

Berikut adalah hasil perhitungan estimasi kedalaman *scouring* akibat arus.:

Tabel 4.13 Kedalaman *scouring* akibat arus

KP	U (m/s)	D (m)	SF	ds_{curr} (m)
1 – 75	0,97	0,304	2	0,42
76 – 83	0,46	0,304	2	0,31

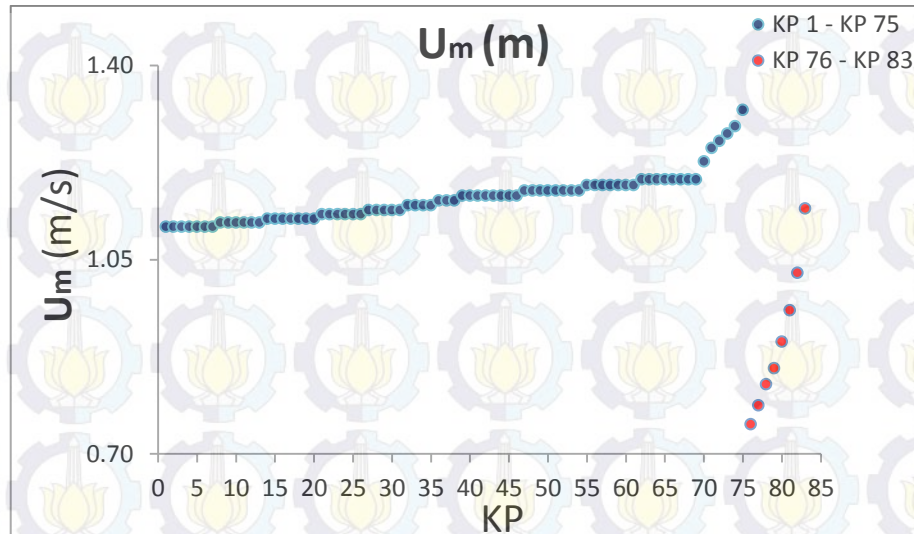
Berdasarkan tabel perhitungan diatas, estimasi kedalaman *scouring* akibat arus adalah minimal 0,31 m di KP 1 – KP 75, dan maksimal 0,42 m di KP 76 – KP 83

b) Kedalaman *scouring* akibat gelombang

Selain karena faktor arus, faktor gelombang juga mampu mengakibatkan gerusan tanah (*scouring*). Ada beberapa faktor yang dipertimbangkan seperti *safety factor* (SF), *keulegan – carpenter number* (KC), diameter pipa (D), Sebagaimana dirumuskan oleh Summer and Fredsoe (1990) :

$$ds_{wave} = 0,1 \times SF \times KC^{0,5} \times D \quad \text{Pers. 47}$$

Sebelum mendapatkan nilai *keulegan – carpenter number* (KC), dihitung terlebih dahulu nilai kecepatan masimum partikel di *seabed* (U_m). Setelah didapat nilai KC baru kemudian dapat menghitung berapa kedalaman *scour* akibat gelombang. Berikut grafik kecepatan maksimum partikel di *seabed* :



Gambar 4.2 Grafik Kecepatan Maksimum Partikel di *seabed*

Berikut adalah hasil perhitungan estimasi kedalaman *scouring* akibat gelombang :

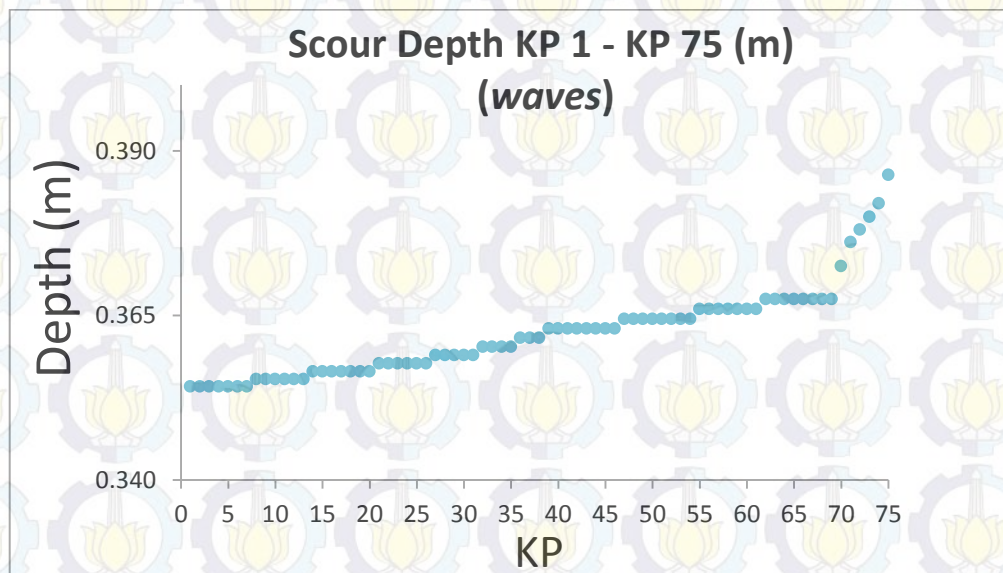
Tabel 4.14 Kedalaman *Scouring* akibat gelombang

KP	H _s (m/s)	h (m)	D (m)	KC Number	SF	ds _{wave} (m)
1	3.2	58	0.304	33.94	2	0.35
2	3.2	58	0.304	33.94	2	0.35
3	3.2	58	0.304	33.94	2	0.35
4	3.2	58	0.304	33.94	2	0.35
5	3.2	58	0.304	33.94	2	0.35
6	3.2	58	0.304	33.94	2	0.35
7	3.2	58	0.304	33.94	2	0.35
8	3.2	57	0.304	34.15	2	0.36
9	3.2	57	0.304	34.15	2	0.36
10	3.2	57	0.304	34.15	2	0.36
11	3.2	57	0.304	34.15	2	0.36
12	3.2	57	0.304	34.15	2	0.36
13	3.2	57	0.304	34.15	2	0.36
14	3.2	56	0.304	34.37	2	0.36
15	3.2	56	0.304	34.37	2	0.36
16	3.2	56	0.304	34.37	2	0.36
17	3.2	56	0.304	34.37	2	0.36
18	3.2	56	0.304	34.37	2	0.36
19	3.2	56	0.304	34.37	2	0.36
20	3.2	56	0.304	34.37	2	0.36
21	3.2	55	0.304	34.61	2	0.36
22	3.2	55	0.304	34.61	2	0.36

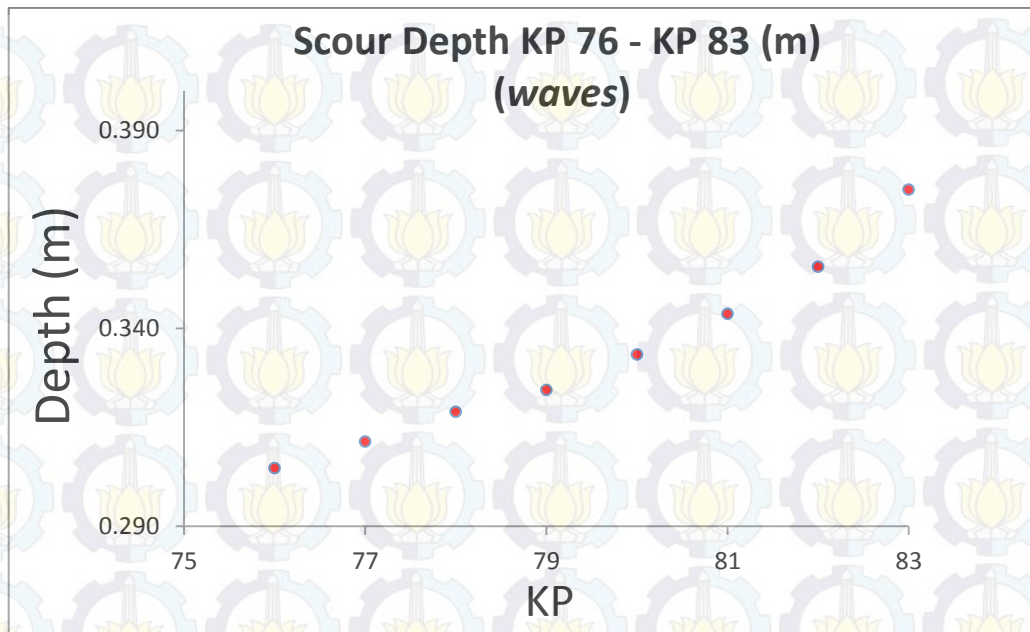
KP	H _s (m/s)	h (m)	D (m)	KC Number	SF	ds _{wave} (m)
23	3.2	55	0.304	34.61	2	0.36
24	3.2	55	0.304	34.61	2	0.36
25	3.2	55	0.304	34.61	2	0.36
26	3.2	55	0.304	34.61	2	0.36
27	3.2	54	0.304	34.85	2	0.36
28	3.2	54	0.304	34.85	2	0.36
29	3.2	54	0.304	34.85	2	0.36
30	3.2	54	0.304	34.85	2	0.36
31	3.2	54	0.304	34.85	2	0.36
32	3.2	53	0.304	35.10	2	0.36
33	3.2	53	0.304	35.10	2	0.36
34	3.2	53	0.304	35.10	2	0.36
35	3.2	53	0.304	35.10	2	0.36
36	3.2	52	0.304	35.37	2	0.36
37	3.2	52	0.304	35.37	2	0.36
38	3.2	52	0.304	35.37	2	0.36
39	3.2	51	0.304	35.64	2	0.36
40	3.2	51	0.304	35.64	2	0.36
41	3.2	51	0.304	35.64	2	0.36
42	3.2	51	0.304	35.64	2	0.36
43	3.2	51	0.304	35.64	2	0.36
44	3.2	51	0.304	35.64	2	0.36
45	3.2	51	0.304	35.64	2	0.36
46	3.2	51	0.304	35.64	2	0.36
47	3.2	50	0.304	35.93	2	0.36
48	3.2	50	0.304	35.93	2	0.36
49	3.2	50	0.304	35.93	2	0.36
50	3.2	50	0.304	35.93	2	0.36
51	3.2	50	0.304	35.93	2	0.36
52	3.2	50	0.304	35.93	2	0.36
53	3.2	50	0.304	35.93	2	0.36
54	3.2	50	0.304	35.93	2	0.36
55	3.2	49	0.304	36.22	2	0.37
56	3.2	49	0.304	36.22	2	0.37
57	3.2	49	0.304	36.22	2	0.37
58	3.2	49	0.304	36.22	2	0.37
59	3.2	49	0.304	36.22	2	0.37
60	3.2	49	0.304	36.22	2	0.37
61	3.2	49	0.304	36.22	2	0.37
62	3.2	48	0.304	36.53	2	0.37
63	3.2	48	0.304	36.53	2	0.37
64	3.2	48	0.304	36.53	2	0.37
65	3.2	48	0.304	36.53	2	0.37
66	3.2	48	0.304	36.53	2	0.37

KP	H_s (m/s)	h (m)	D (m)	KC Number	SF	ds_{wave} (m)
67	3.2	48	0.304	36.53	2	0.37
68	3.2	48	0.304	36.53	2	0.37
69	3.2	48	0.304	36.53	2	0.37
70	3.2	45	0.304	37.53	2	0.37
71	3.2	43	0.304	38.26	2	0.38
72	3.2	42	0.304	38.65	2	0.38
73	3.2	41	0.304	39.06	2	0.38
74	3.2	40	0.304	39.48	2	0.38
75	3.2	38	0.304	40.37	2	0.39
76	2.1	36	0.304	25.10	2	0.30
77	2.1	33	0.304	26.23	2	0.31
78	2.1	30	0.304	27.50	2	0.32
79	2.1	28	0.304	28.45	2	0.32
80	2.1	25	0.304	30.06	2	0.33
81	2.1	22	0.304	31.94	2	0.34
82	2.1	19	0.304	34.19	2	0.36
83	2.1	15	0.304	38.04	2	0.38

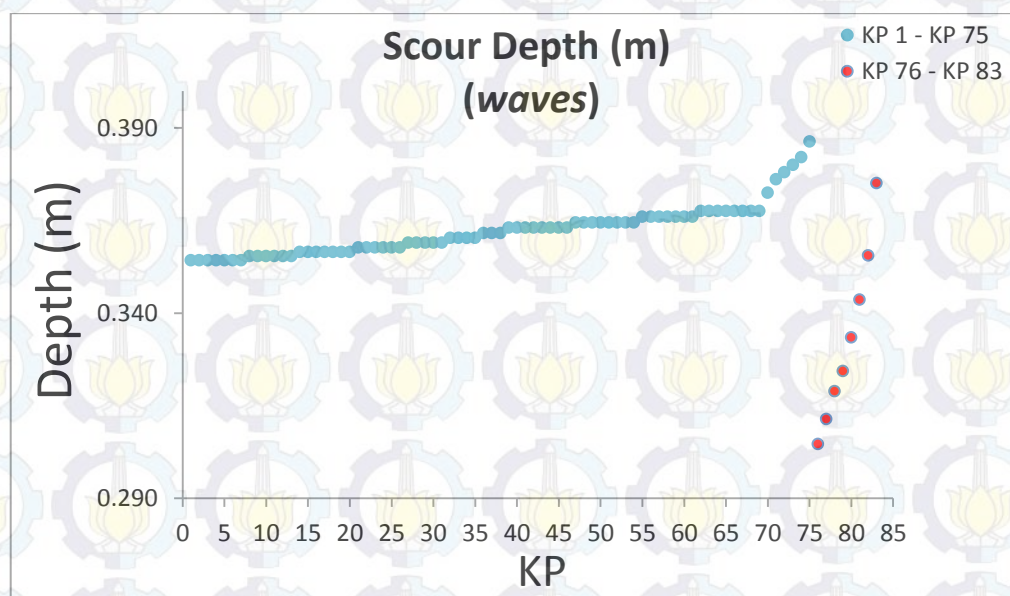
Berdasarkan tabel perhitungan kedalaman *scouring* akibat gelombang didapat kedalaman *scour* minimal adalah sebesar 0,305 m pada KP 76 dan maksimal 0,386 m pada KP 75. Berikut adalah grafik estimasi kedalaman *scouring* akibat gelombang.



Gambar 4.3 Grafik kedalaman *scouring* akibat gelombang (1)



Gambar 4.4 Grafik kedalaman *scouring* akibat gelombang (2)



Gambar 4.5 Grafik kedalaman *scouring* akibat gelombang (3)

Dari ketiga grafik tersebut perbedaan yang cukup signifikan pada kedalaman lubang scour akibat gelombang pada KP 1 – KP 75 dan KP 76 – 83. Hal tersebut diakibatkan oleh perbedaan kondisi lingkungan seperti

kedalaman perairan, tinggi dan periode gelombang dan kecepatan arus yang signifikan.

c) **Kedalaman *scouring* akibat arus & gelombang**

Dalam menentukan kedalaman *scour*, semua parameter harus diperhitungkan, baik beban arus maupun beban gelombang untuk mendapatkan estimasi *scour depth* yang akurat. Berikut adalah formula perhitungan estimasi kedalaman *scouring* akibat beban arus & gelombang sebagaimana dirumuskan Summer & Fredsoe (1990) :

$$ds_{curr+waves} = \left(\frac{U}{U_{cr}} \right)^{0,5} \times ds_{wave} \quad \text{Pers. 48}$$

Berikut adalah hasil perhitungan estimasi kedalaman *scouring* akibat arus & gelombang :

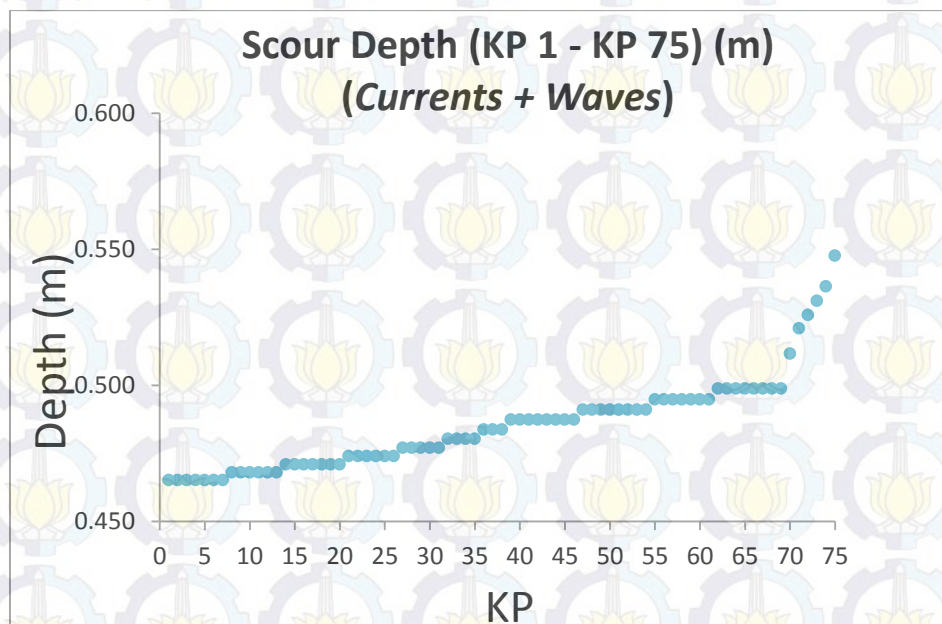
Tabel 4.15 Kedalaman *scouring* akibat arus & gelombang

KP	U (m/s)	h (m)	D (m)	U _{cr} (m/s)	ds _{wave} (m)	ds _{curr+waves} (m)
1	0.97	58	0.304	0.562	0.354	0.465
2	0.97	58	0.304	0.562	0.354	0.465
3	0.97	58	0.304	0.562	0.354	0.465
4	0.97	58	0.304	0.562	0.354	0.465
5	0.97	58	0.304	0.562	0.354	0.465
6	0.97	58	0.304	0.562	0.354	0.465
7	0.97	58	0.304	0.562	0.354	0.465
8	0.97	57	0.304	0.559	0.355	0.468
9	0.97	57	0.304	0.559	0.355	0.468
10	0.97	57	0.304	0.559	0.355	0.468
11	0.97	57	0.304	0.559	0.355	0.468
12	0.97	57	0.304	0.559	0.355	0.468
13	0.97	57	0.304	0.559	0.355	0.468
14	0.97	56	0.304	0.556	0.356	0.471
15	0.97	56	0.304	0.556	0.356	0.471
16	0.97	56	0.304	0.556	0.356	0.471
17	0.97	56	0.304	0.556	0.356	0.471
18	0.97	56	0.304	0.556	0.356	0.471
19	0.97	56	0.304	0.556	0.356	0.471
20	0.97	56	0.304	0.556	0.356	0.471
21	0.97	55	0.304	0.552	0.358	0.474
22	0.97	55	0.304	0.552	0.358	0.474
23	0.97	55	0.304	0.552	0.358	0.474

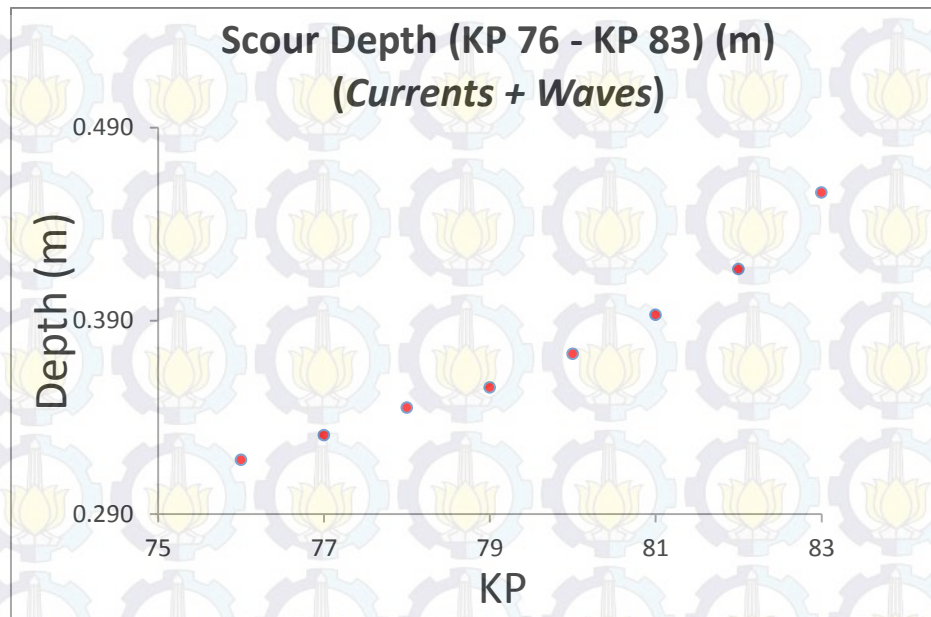
KP	U (m/s)	h (m)	D (m)	U _{cr} (m/s)	ds _{wave} (m)	ds _{curr+waves} (m)
24	0.97	55	0.304	0.552	0.358	0.474
25	0.97	55	0.304	0.552	0.358	0.474
26	0.97	55	0.304	0.552	0.358	0.474
27	0.97	54	0.304	0.549	0.359	0.477
28	0.97	54	0.304	0.549	0.359	0.477
29	0.97	54	0.304	0.549	0.359	0.477
30	0.97	54	0.304	0.549	0.359	0.477
31	0.97	54	0.304	0.549	0.359	0.477
32	0.97	53	0.304	0.545	0.360	0.480
33	0.97	53	0.304	0.545	0.360	0.480
34	0.97	53	0.304	0.545	0.360	0.480
35	0.97	53	0.304	0.545	0.360	0.480
36	0.97	52	0.304	0.542	0.362	0.484
37	0.97	52	0.304	0.542	0.362	0.484
38	0.97	52	0.304	0.542	0.362	0.484
39	0.97	51	0.304	0.538	0.363	0.487
40	0.97	51	0.304	0.538	0.363	0.487
41	0.97	51	0.304	0.538	0.363	0.487
42	0.97	51	0.304	0.538	0.363	0.487
43	0.97	51	0.304	0.538	0.363	0.487
44	0.97	51	0.304	0.538	0.363	0.487
45	0.97	51	0.304	0.538	0.363	0.487
46	0.97	51	0.304	0.538	0.363	0.487
47	0.97	50	0.304	0.534	0.364	0.491
48	0.97	50	0.304	0.534	0.364	0.491
49	0.97	50	0.304	0.534	0.364	0.491
50	0.97	50	0.304	0.534	0.364	0.491
51	0.97	50	0.304	0.534	0.364	0.491
52	0.97	50	0.304	0.534	0.364	0.491
53	0.97	50	0.304	0.534	0.364	0.491
54	0.97	50	0.304	0.534	0.364	0.491
55	0.97	49	0.304	0.530	0.366	0.495
56	0.97	49	0.304	0.530	0.366	0.495
57	0.97	49	0.304	0.530	0.366	0.495
58	0.97	49	0.304	0.530	0.366	0.495
59	0.97	49	0.304	0.530	0.366	0.495
60	0.97	49	0.304	0.530	0.366	0.495
61	0.97	49	0.304	0.530	0.366	0.495
62	0.97	48	0.304	0.526	0.367	0.499
63	0.97	48	0.304	0.526	0.367	0.499
64	0.97	48	0.304	0.526	0.367	0.499
65	0.97	48	0.304	0.526	0.367	0.499
66	0.97	48	0.304	0.526	0.367	0.499
67	0.97	48	0.304	0.526	0.367	0.499
68	0.97	48	0.304	0.526	0.367	0.499
69	0.97	48	0.304	0.526	0.367	0.499
70	0.97	45	0.304	0.514	0.372	0.512
71	0.97	43	0.304	0.506	0.376	0.521

KP	U (m/s)	h (m)	D (m)	U _{cr} (m/s)	ds _{wave} (m)	ds _{curr+waves} (m)
72	0.97	42	0.304	0.501	0.378	0.526
73	0.97	41	0.304	0.497	0.380	0.531
74	0.97	40	0.304	0.492	0.382	0.536
75	0.97	38	0.304	0.483	0.386	0.548
76	0.46	36	0.304	0.422	0.305	0.318
77	0.46	33	0.304	0.408	0.311	0.331
78	0.46	30	0.304	0.393	0.319	0.345
79	0.46	28	0.304	0.383	0.324	0.355
80	0.46	25	0.304	0.368	0.333	0.373
81	0.46	22	0.304	0.352	0.344	0.393
82	0.46	19	0.304	0.335	0.355	0.417
83	0.46	15	0.304	0.311	0.375	0.456

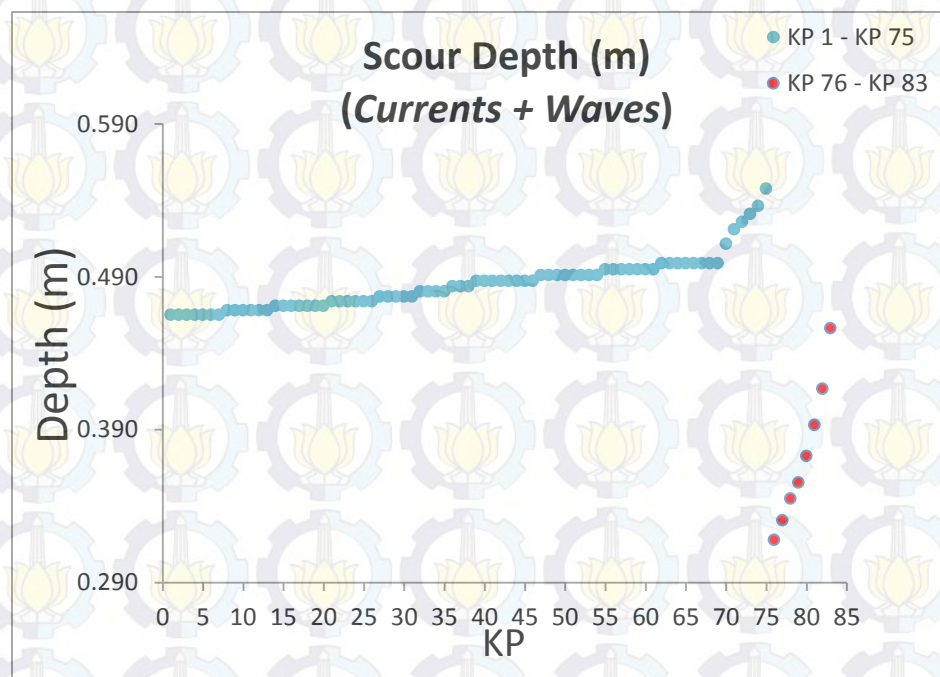
Berdasarkan tabel perhitungan estimasi kedalaman *scouring* akibat arus & gelombang didapat kedalaman *scour* minimal sedalam 0,318 m pada KP 76 dan maksimal sedalam 0,548 m pada KP 75. Berikut adalah grafik estimasi kedalaman *scour* akibat arus dan gelombang.



Gambar 4.6 Grafik kedalaman *scouring* akibat arus dan gelombang (1)



Gambar 4.7 Grafik kedalaman *scouring* akibat arus dan gelombang (2)



Gambar 4.8 Grafik kedalaman *scouring* akibat arus dan gelombang (3)

Berdasarkan ketiga grafik kedalaman *scouring* akibat arus dan gelombang diatas, dapat terbaca bahwa semakin dangkal perairan semakin besar pula lubang *scouring* yang terjadi. Namun, kedalaman perairan bukan satu – satunya faktor yang mempengaruhi besaran *scour depth*, sebagaimana

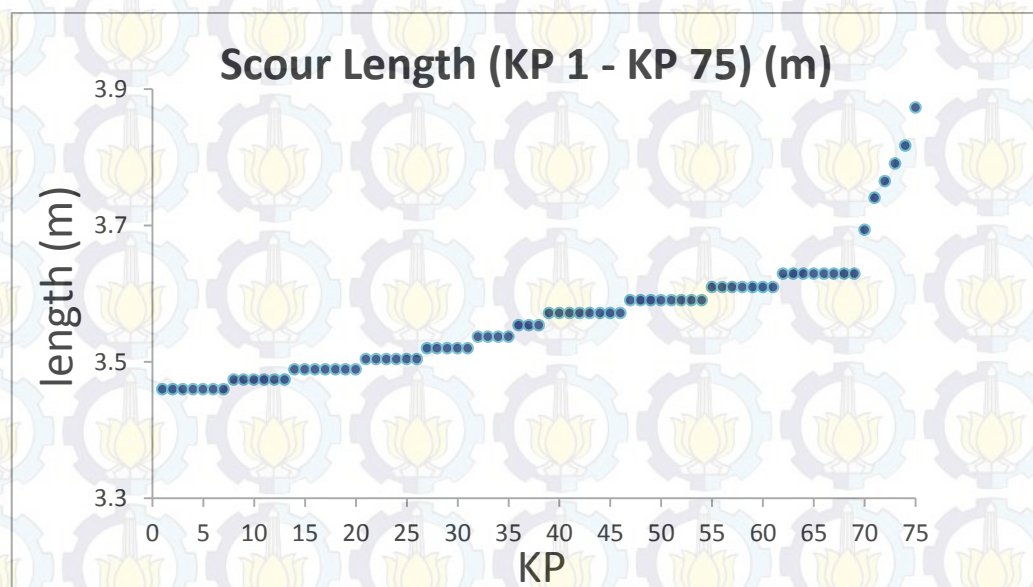
ditunjukkan kedua garis pada Gambar 4.6 diatas, KP 76 memiliki perairan yang lebih dangkal dibanding KP 75, namun kedalaman *lscour* nya malah jauh lebih kecil. Hal tersebut diakibatkan oleh kondisi lingkungan yang lainnya seperti tinggi gelombang dan kecepatan arus yang terjadi pada KP 76 lebih kecil.

4.4.2 Lebar *scouring*

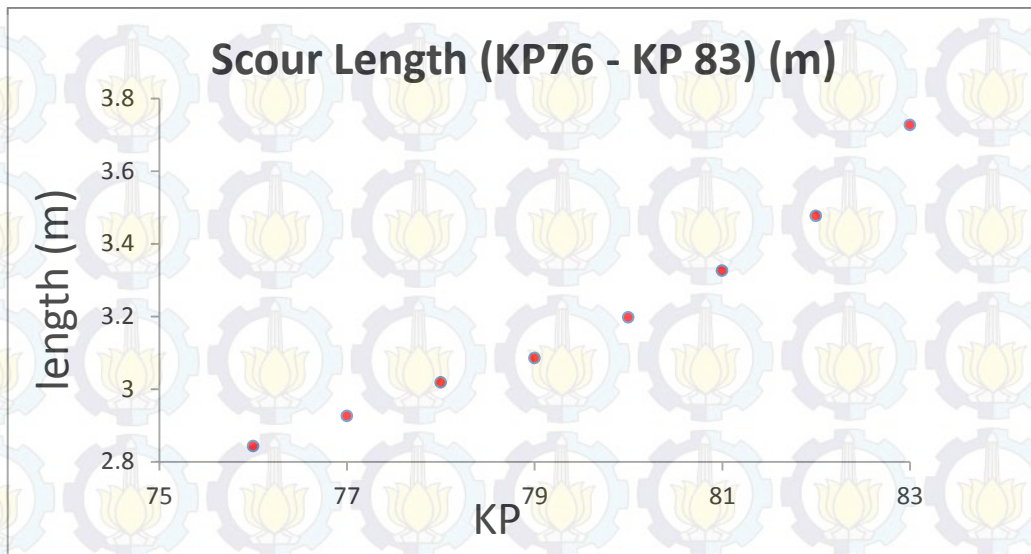
Setelah mengetahui nilai dari kedalaman scour langkah selanjutnya adalah memperhitungkan berapa besar nilai dari lebar scour yang dimana nilai lebar scour dihitung dari tengah pipa hingga akhir lubang scour. Perhitungan lebar *scouring* memakai persamaan sebagai berikut :

$$\frac{W}{D} = 0,35KC^{0,65} \quad \text{Pers. 47}$$

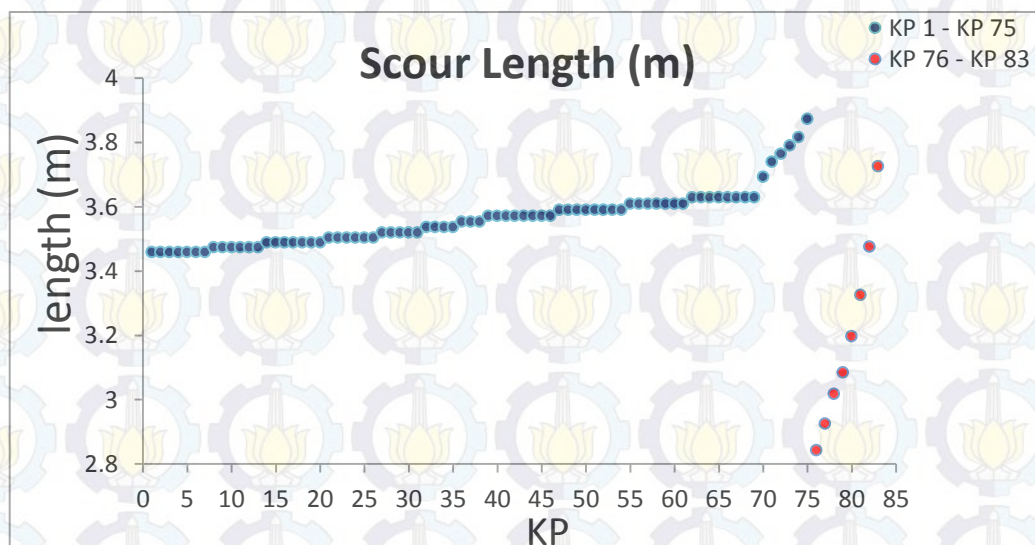
Berikut adalah grafik hasil perhitungan estimasi lebar *scouring* :



Gambar 4.9 Grafik lebar lubang *scour* (1)



Gambar 4.10 Grafik lebar lubang *scour* (2)



Gambar 4.11 Grafik lebar lubang *scour* (3)

Berdasarkan hasil perhitungan lebar lubang *scour*, didapat lebar lubang minimum selebar 2,84 m terletak di KP 76 dan lebar lubang *scour* maksimum selebar 3,87 m yang terletak pada KP 75. Sama halnya dengan kedalaman *scour*, bahwa lebar *scour* yang terjadi juga dipengaruhi oleh kondisi perairan, seperti kedalaman perairan, tinggi dan periode gelombang, serta kecepatan arus.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

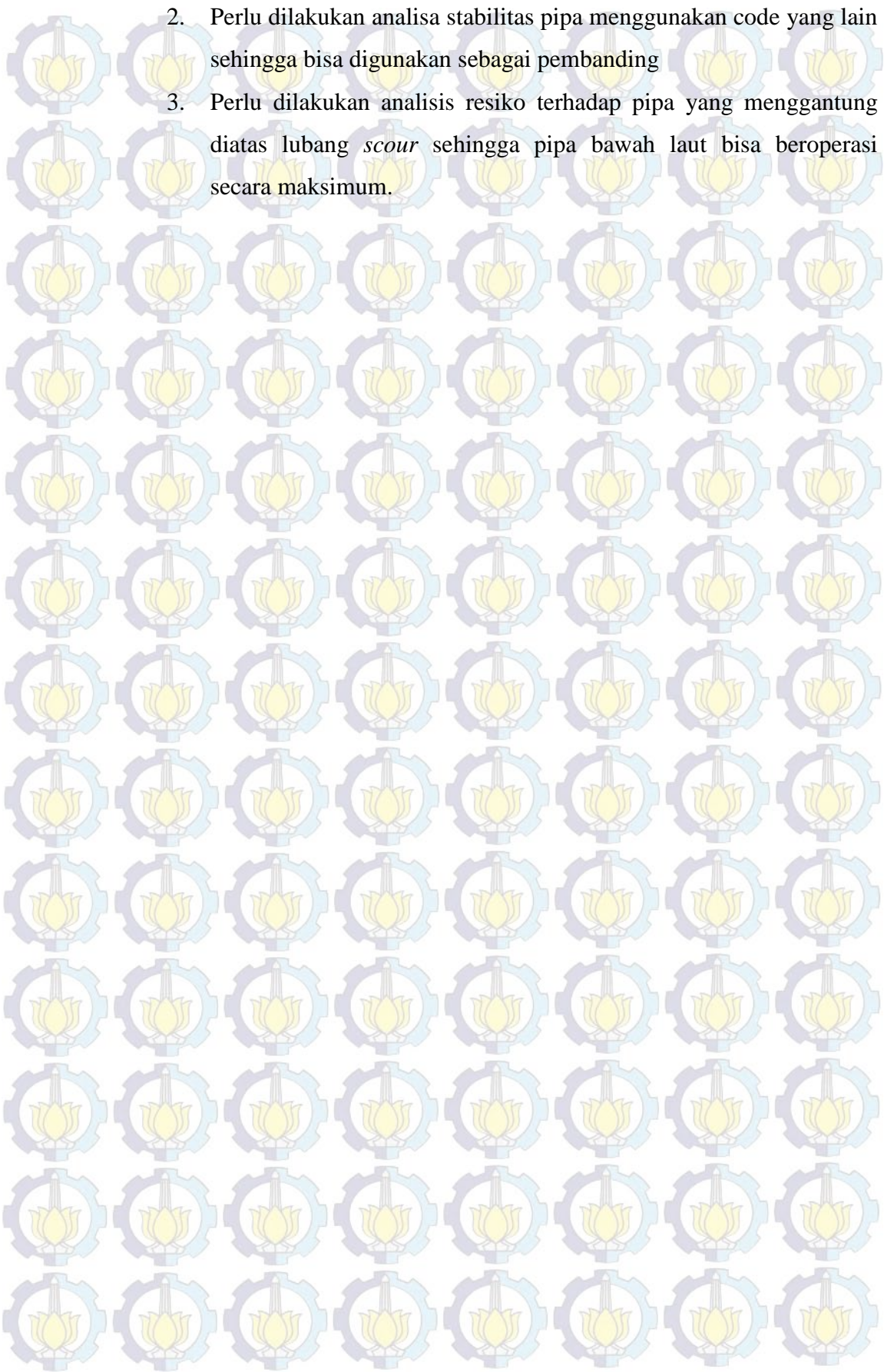
Beberapa kesimpulan yang bisa diambil dari proses analisa yang telah dilakukan dan mampu menjawab perumusan masalah adalah sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil perhitungan analisa stabilitas vertikal pipa, pada perairan dalam maupun transisi didapat hasil SF_v (safety factor secara vertikal) sebesar 1,86. Berdasarkan nilai tersebut, pipa dapat dinyatakan stabil secara vertikal karena sudah melampaui SF (safety factor) sebesar 1,1. Pipa jugadinyatakan stabil secara lateral karena nilai SF_L (safety factor secara lateral) pipa bawah laut pada perairan transisi sebesar 5,84 dan sebesar 4,95 pada perairan dalam telah melewati nilai SF sebesar 1,1 sesuai dengan code DNV RP E305.
2. Nilai maksimum kedalaman *scouring* adalah sebesar 0,42 m untuk *scouring* akibat pengaruh arus dan sebesar 0,38 m untuk *scouring* akibat gelombang. Dan nilai maksimum untuk kedalaman *scour* akibat arus dan gelombang adalah sebesar 0,54 m. Disamping perhitungan kedalaman lubang *scouring*, dalam tugas akhir ini juga dilakukan perhitungan lebar *scouring* dengan nilai maksimumnya adalah sebesar 3,87 m.

5.2 Saran

Beberapa hal yang dapat dijadikan saran yang sifatnya membangun penulisan ini diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan perhitungan propagasi *scour* sehingga dapat memperkirakan laju *scouring* tiap tahunnya dan pada tahun ke – berapa mencapai titik *scour* maksimum.

- 
2. Perlu dilakukan analisa stabilitas pipa menggunakan code yang lain sehingga bisa digunakan sebagai pembanding
 3. Perlu dilakukan analisis resiko terhadap pipa yang menggantung diatas lubang *scour* sehingga pipa bawah laut bisa beroperasi secara maksimum.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Mechanical Engineers (ASME).B31.4. 2002. **Pipeline Transportation Systems for liquid Hydrocarbon and other liquids.** USA.

Bijker, E.W. and Leeuwensteln, N. (1984). **Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents.** *Seabed Mechanics*, B. Denness, ed., Graham and Trotman, Gettysburg, Md., pp. 235-242.

Chiew, Y-M. (1990). **Mechanics of local scour around submarine pipelines.** J. Hydraulic Engineering. ASCE, 116, No. 4. pp. 515-529.

Det Norske Veritas. 1988. DNV RP-E305, *On Bottom Stability Design of Submarine Pipelines.* Norway.

Det Norske Veritas. 2007. DNV OS-F109, *On-Bottom Stability Desain of Submarine Pipelines.* Norway.

Det Norske Veritas. 2010. **DNV-RP-F109. On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines.** Norway.

Halliwell AR. (1986). **An Introduction to Offshore Pipelines.** University College, Cork.

Ishihara, K. and Yamazaki, A. (1984). **Analysis of Wave – Induced Liquefaction in Seabed Deposits of Sands.** Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Enggining. Tokyo.

Kenny J.P.. (1993). **Structural Analysis of Pipeline spans.** Health and Safety Executive, USA.

Kinsman, B. (1965). **Windwave.** Dove Publication. Inc, New York.

Mousselli, A.H. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis and Method.* PennWell Books. Oklahoma.

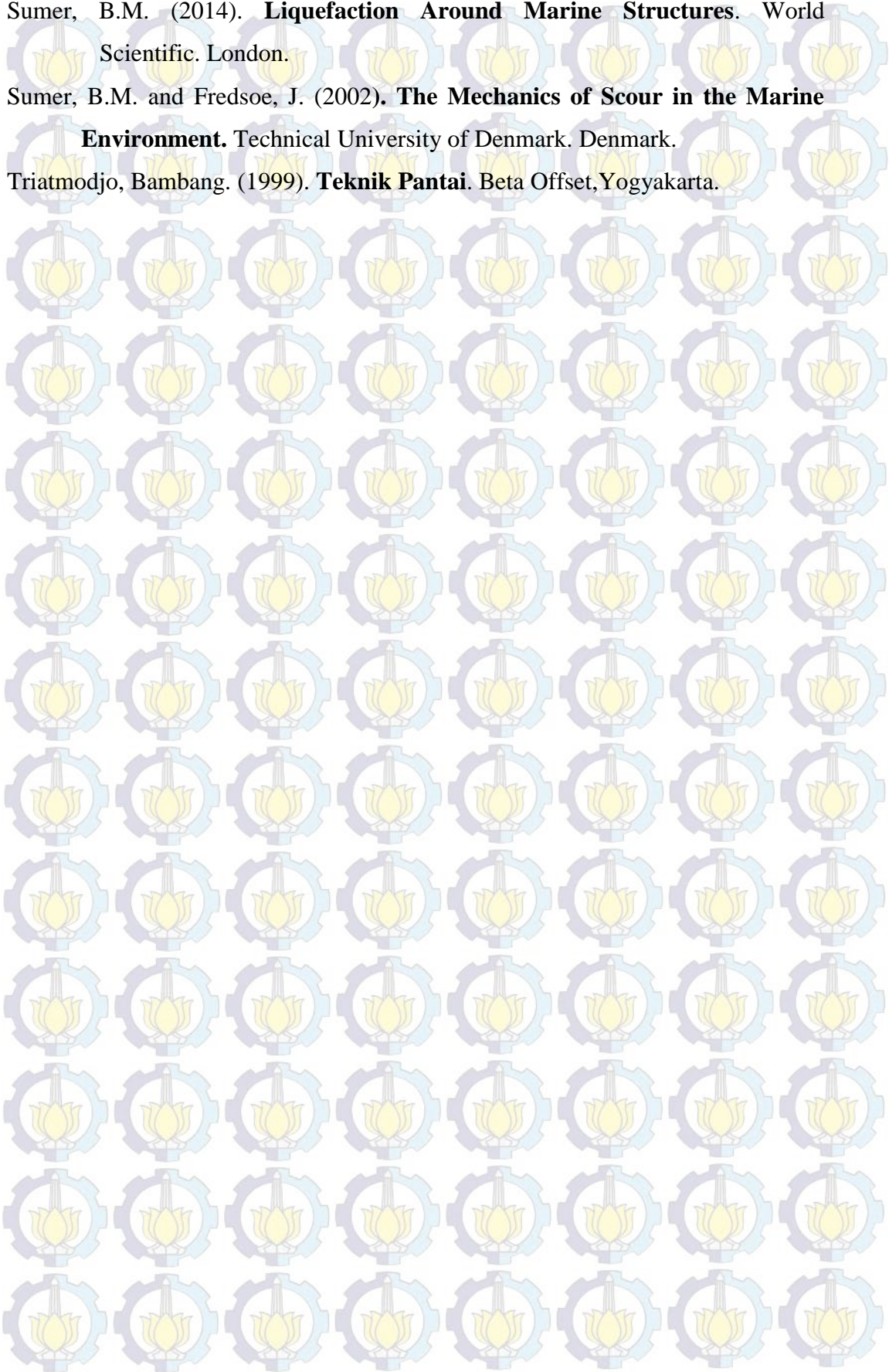
Pruska, M. J. (1973). Effect of Initial Stress – Strain Relation. **Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 4, pp. 26-28.**

Soegiono. 2007. **Pipa Laut.** Airlangga University Press. Surabaya.

Sumer, B.M. (2014). **Liquefaction Around Marine Structures**. World Scientific. London.

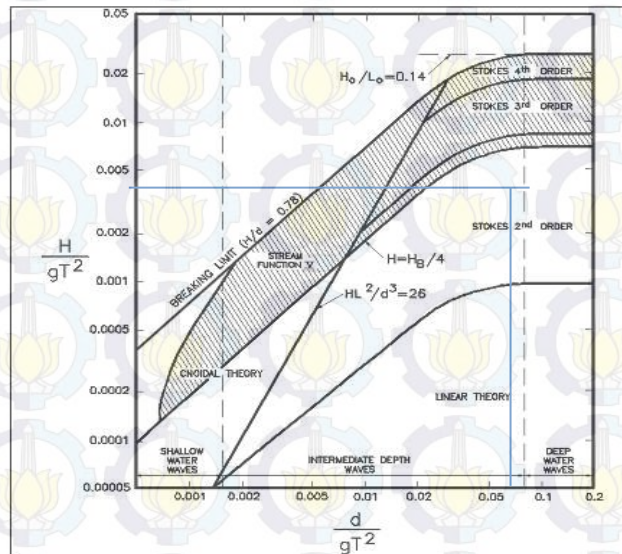
Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2002). **The Mechanics of Scour in the Marine Environment**. Technical University of Denmark. Denmark.

Triatmodjo, Bambang. (1999). **Teknik Pantai**. Beta Offset, Yogyakarta.



Stabilitas Pipa (deep)

- Menentukan Teori Gelombang



Input data :

$$H = 3.2 \text{ m} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad gT^2 = 725.548$$

$$T = 8.6 \text{ s} \quad d = 40 \text{ m}$$

$$H/gT^2 = 0.0044 \quad d/gT^2 = 0.055$$

>> Berdasarkan grafik tersebut, maka menggunakan teori gelombang **Stoke Orde Dua** .

Persamaan yang digunakan pada teori stoke tersebut didapat dari persamaan berikut (Mouselli, 1981) :

Kecepatan Horizontal Partikel :

$$U = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos \theta$$

$$= 4.60247\text{E-}18 + -2.5\text{E-}06$$

$$= -2.472\text{E-}06 \text{ m/s}$$

Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang Efektif (U_w)

$$U_w = 0.778 U_0^2 \frac{D}{y_0}^{0.286}$$
$$= 1.3558 \text{E-14 m/s}$$

Menghitung Kecepatan Partikel (U_D)

$$U_D = U_r \frac{\left(1 + \frac{Z_0}{D}\right) \left(\ln \left(\frac{D}{Z_0} + 1\right) (-1)\right)}{\left(\ln \frac{Z_r}{Z_0} + 1\right)}$$
$$= 0.616 \text{ m/s}$$

Dengan : $U_r = 0.85 \text{ m/s}$ current speed at 10% of depth

$Z_0 = 0.000005 \text{ m/s}$ untuk tanah clay

$Z_r = 5 \text{ m/s}$ DNV

Menghitung Kecepatan Partikel Efektif (U_c)

$$U_c = 0.778 U_0^2 \frac{D}{y_0}^{0.286}$$
$$= 0.543 \text{ m/s}$$

Menghitung Kecepatan Efektif yang Mengenai Pipa (U_e)

$$U_e = U_w + U_c = \sqrt{U_w^2 + U_c^2 + 2 \cdot U_w \cdot U_c \cdot \cos \theta}$$
$$= 0.543 \text{ m/s}$$

Menghitung F_d , F_i dan F_l

$$Re = \frac{U_e \cdot D}{\nu}$$

$= 14622.1$ (masukkan ke tabel Reynolds Number)

Reynolds number (R_e)	Hydrodynamic Coefficient		
	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < R_e < 1.0 \times 10^5$	1.6	1.0	2.0
$1.0 \times 10^5 < R_e < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{R_e}{3 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$	2.0
$2.5 \times 10^5 < R_e < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$
$R_e > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

Didapat :

$C_d =$	1.3
$C_l =$	1.5
$C_i =$	2

Drag Force

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2$$

$$= 59.83 \text{ N/m}$$

Inertia Force

$$F_i = \rho C_m \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \frac{du}{dt}$$

Dengan,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta$$

$$= 0.6176 + 6.8705E-22$$

$$F_i = 91.85 \text{ N/m}$$

Lift Force

$$F_l = \frac{1}{2} \rho C_1 D U_e^2$$

$$F_l = 69.03 \text{ N/m}$$

Menghitung Berat Terendam Pipa (W_s)

- **Diameter Luar Pipa (D)**

$$D = D_0 + 2.t_{corr} + 2.t_c$$

$$= 0.385 \text{ m}$$

- **Diameter Dalam Pipa (D_i)**

$$D_i = D_0 - 2.t_{st}$$

$$D_i = 0.283 \text{ m}$$

- **Berat Baja di Udara (W_{st})**

$$W_{st} = \pi/4 \rho_{st} (D_o^2 - D_i^2) g$$

$$W_{st} = 731.492 \text{ N/m}$$

- **Berat Lapisan Anti Karat di Udara (W_{corr})**

$$W_{corr} = \pi/4 \rho_{corr} [(D_o + 2.t_{corr})^2 - D_i^2] g$$

$$W_{corr} = 132.129 \text{ N/m}$$

- **Berat Selimut Beton di Udara (W_c)**

$$W_c = \pi/4 \rho_c [(D_o + 2.t_{corr} + 2.t_c)^2 - (D_o + 2.t_{corr})^2] g$$

$$W_c = 1293.965 \text{ N/m}$$

- **Berat Pengisi Pipa (W_{cont})**

$$W_{cont} = D_i^2 \cdot \rho_{cont} \cdot g$$

$$W_{cont} = 27.025 \text{ N/m}$$

- **Bouyancy (B)**

$$B = \pi/4 \rho_w (D_o + 2t_{corr} + 2t_c)^2 \cdot g$$

$$B = 1169.995 \text{ N/m}$$

- **Berat Terendam Pipa (Ws)**

$$W_s = W_{st} + W_{corr} + W_c + W_{cont} - B$$

$$W_s = 1014.616 \text{ N/m}$$

- **Berat Terendam Minimum Pipa (Ws_req)**

$$W_{s_req} = \left[\frac{(F_D + F_I) + \mu \cdot F_L}{\mu} \right] \cdot F_w$$

$$= 314.31 \text{ N/m}$$

Perhitungan Koefisien Hidrodinamika

- **Menghitung Periode Natural Gelombang Pada Kedalaman (T_n)**

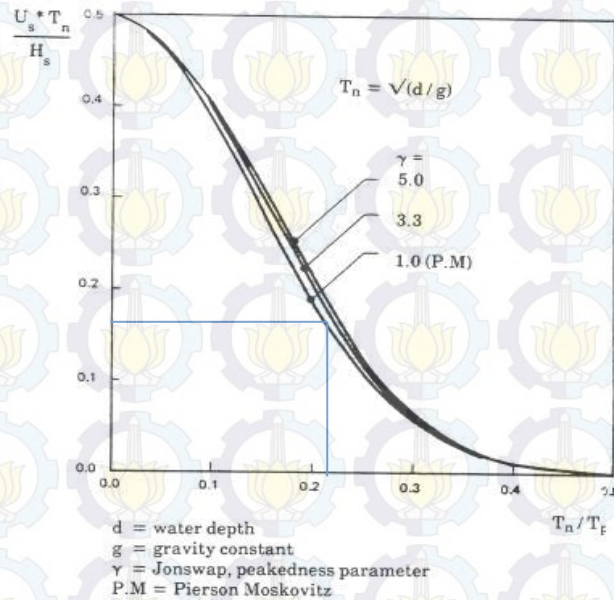
$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}}$$

$$= 2.01$$

$$T_p = 9.3 \text{ s}$$

$$\frac{T_n}{T_p} = 0.217$$

- Mencari Nilai U_s Menggunakan Grafik P.M (Pierson Moskowitz)



$$\theta = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$= 5.198$$

$$\gamma = 5 ; \text{if } \theta \leq 3,6 \cdot \frac{\text{sec}}{\sqrt{m}}$$

$$\gamma = 1 ; \text{if } \theta \leq 5 \cdot \frac{\text{sec}}{\sqrt{m}}$$

$$\gamma = 3,3 \text{ otherwise}$$

$$(U_s \cdot T_n) / H_s = 0.16 \text{ (didapat dari grafik diatas)}$$

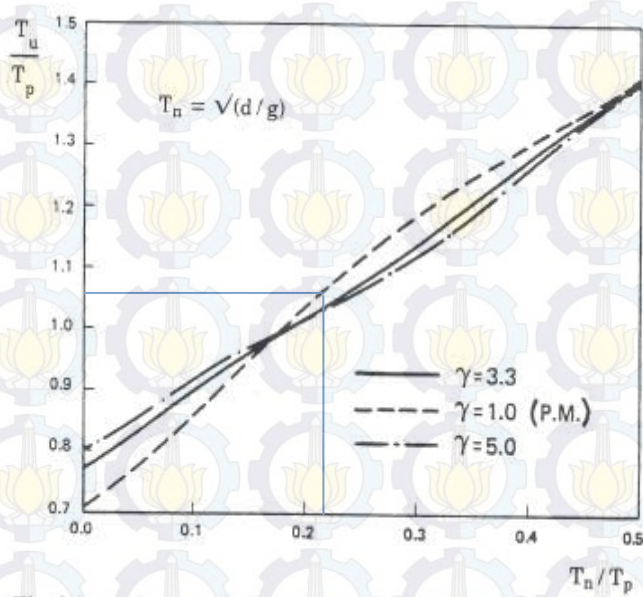
$$U_s = 0.253$$

- Mencari Nilai T_u Menggunakan Grafik P.M (Pierson Moskowitz)

$$\frac{T_n}{T_p} = 0.217$$

$$\frac{T_u}{T_p} = 1.05 \text{ (didapat dari grafik dibawah)}$$

$$T_u = 9.76 \text{ s}$$

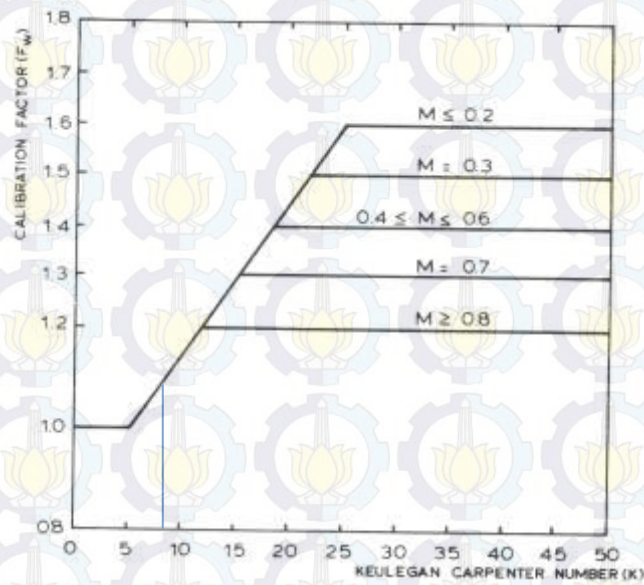


- Menghitung Faktor Kalibrasi (F_w)

$$M = \frac{U_D}{U_S} = 2.43$$

Keulegan Carpenter Number

$$K = U_S \times \frac{T_U}{D} = 8.14$$



$$F_w = 1.1 \text{ (didapat dari grafik diatas)}$$

Safety Factor

- **Lateral Stability Safety Factor**

$$SF_L = \frac{(W_S - F_L) \cdot \mu}{F_n + F_l} \geq 1,1$$

$$SF_L = 4.36 \geq 1 \quad \text{OK}$$

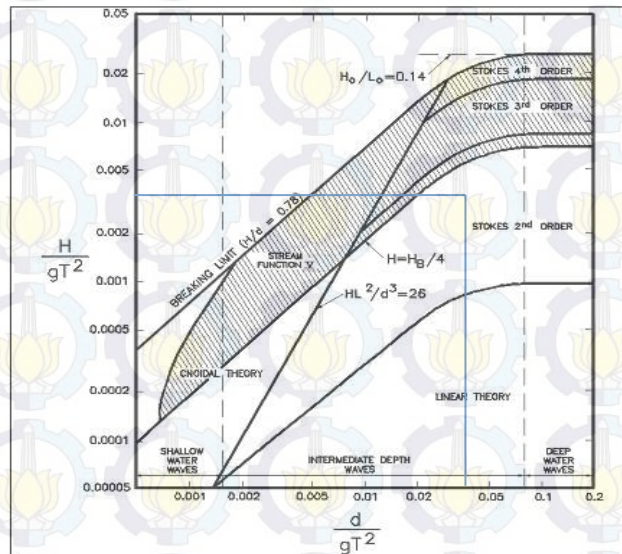
- **Vertical Stability Safety Faktör**

$$SF_V = \frac{W_S + B}{B} \geq 1,1$$

$$SF_V = 1.86 \geq 1,1 \quad \text{OK}$$

Stabilitas Pipa (intermediate)

- Menentukan Teori Gelombang



Input data :

$$H = 2.1 \text{ m} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad gT^2 = 659.62$$

$$T = 8.2 \text{ s} \quad d = 30 \text{ m}$$

$$H/gT^2 = 0.00318 \quad d/gT^2 = 0.0454$$

>> Berdasarkan grafik tersebut, maka menggunakan teori gelombang **Stoke Orde Dua**.

Persamaan yang digunakan pada teori stoke tersebut didapat dari persamaan berikut (Mouselli, 1981) :

Kecepatan Horizontal Partikel :

$$\begin{aligned} U &= \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd} \cos \theta \\ &= 6.0316\text{E-}18 + -2.2\text{E-}05 \\ &= -1.804\text{E-}05 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang Efektif (U_w)

$$U_w = 0.778 U_0^2 \frac{D}{y_0}^{0.286}$$
$$= 1.287 \text{E-12 m/s}$$

Menghitung Kecepatan Partikel (U_D)

$$U_D = U_r \frac{\left(1 + \frac{Z_0}{D}\right) \left(\ln \left(\frac{D}{Z_0} + 1\right) - 1\right)}{\left(\ln \frac{Z_r}{Z_0} + 1\right)}$$
$$= 0.346 \text{ m/s}$$

Dengan : $U_r = 0.46 \text{ m/s}$ current speed at 10% of depth

$Z_0 = 0.000005 \text{ m/s}$ untuk tanah clay

$Z_r = 3 \text{ m/s}$ DNV

Menghitung Kecepatan Partikel Efektif (U_e)

$$U_e = 0.778 U_0^2 \frac{D}{y_0}^{0.286}$$
$$= 0.305 \text{ m/s}$$

Menghitung Kecepatan Efektif yang Mengenai Pipa (U_e)

$$U_e = U_w + U_c = \sqrt{U_w^2 + U_c^2 + 2 \cdot U_w \cdot U_c \cdot \cos \theta}$$
$$= 0.305 \text{ m/s}$$

Menghitung F_d , F_i dan F_l

$$Re = \frac{U_e \cdot D}{\nu}$$

$= 8216.9$ (masukkan ke tabel Reynolds Number)

Reynolds number (R_e)	Hydrodynamic Coefficient		
	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < R_e < 1.0 \times 10^5$	1.6	1.0	2.0
$1.0 \times 10^5 < R_e < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{R_e}{3 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$	2.0
$2.5 \times 10^5 < R_e < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$
$R_e > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

Didapat :

$C_d =$	1.3
$C_l =$	1.5
$C_i =$	2

Drag Force

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2$$

$$= 18.89 \text{ N/m}$$

Inertia Force

$$F_I = \rho C_m \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \frac{du}{dt}$$

Dengan,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta$$

$$= 0.823 + 5.071 \text{E-}21$$

$$F_i = 122.45 \text{ N/m}$$

Lift Force

$$F_l = \frac{1}{2} \rho C_1 D U_e^2$$

$$F_l = 21.80 \text{ N/m}$$

Menghitung Berat Terendam Pipa (W_s)

- **Diameter Luar Pipa (D)**

$$D = D_0 + 2.t_{\text{corr}} + 2.t_c$$

$$= 0.385 \text{ m}$$

- **Diameter Dalam Pipa (D_i)**

$$D_i = D_0 - 2.t_{\text{st}}$$

$$D_i = 0.283 \text{ m}$$

- **Berat Baja di Udara (W_{st})**

$$W_{\text{st}} = \pi/4 \rho_{\text{st}} (D_o^2 - D_i^2) g$$

$$W_{\text{st}} = 731.492 \text{ N/m}$$

- **Berat Lapisan Anti Karat di Udara (W_{corr})**

$$W_{\text{corr}} = \pi/4 \rho_{\text{corr}} [(D_o + 2.t_{\text{corr}})^2 - D_i^2] g$$

$$W_{\text{corr}} = 132.129 \text{ N/m}$$

- **Berat Selimut Beton di Udara (W_c)**

$$W_c = \pi/4 \rho_c [(D_o + 2.t_{\text{corr}} + 2.t_c)^2 - (D_o + 2.t_{\text{corr}})^2] g$$

$$W_c = 1293.965 \text{ N/m}$$

- **Berat Pengisi Pipa (W_{cont})**

$$W_{\text{cont}} = D_i^2 \cdot \rho_{\text{cont}} \cdot g$$

$$W_{\text{cont}} = 27.025 \text{ N/m}$$

- **Bouyancy (B)**

$$B = \pi/4 \rho_w (D_o + 2t_{corr} + 2t_c)^2 \cdot g$$

$$B = 1169.995 \text{ N/m}$$

- **Berat Terendam Pipa (Ws)**

$$W_s = W_{st} + W_{corr} + W_c + W_{cont} - B$$

$$W_s = 1014.616 \text{ N/m}$$

- **Berat Terendam Minimum Pipa (Ws_req)**

$$W_{s_req} = \left[\frac{(F_D + F_I) + \mu \cdot F_L}{\mu} \right] \cdot F_w$$

$$= 246.101 \text{ N/m}$$

Perhitungan Koefisien Hidrodinamika

- **Menghitung Periode Natural Gelombang Pada Kedalaman (T_n)**

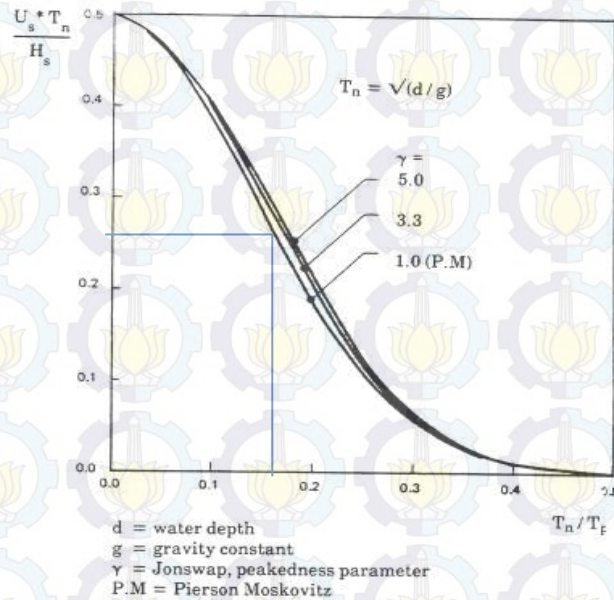
$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}}$$

$$= 2.01$$

$$T_p = 10.13 \text{ s}$$

$$\frac{T_n}{T_p} = 0.172$$

- Mencari Nilai U_s Menggunakan Grafik P.M (Pierson Moskowitz)



$$\theta = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$= 6.99$$

$$\gamma = 5 ; \text{if } \theta \leq 3,6 \cdot \frac{\text{sec}}{\sqrt{m}}$$

$$\gamma = 1 ; \text{if } \theta \leq 5 \cdot \frac{\text{sec}}{\sqrt{m}}$$

$$\gamma = 3,3 \text{ otherwise}$$

$$(U_s \cdot T_n) / H_s = 0.25 \text{ (didapat dari grafik diatas)}$$

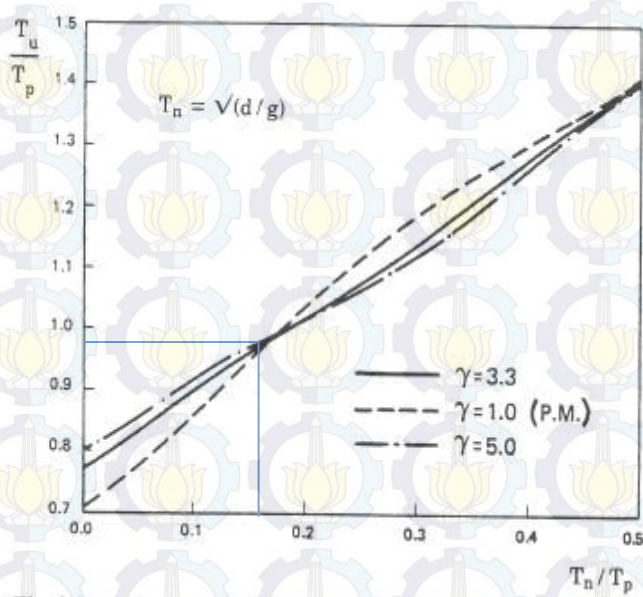
$$U_s = 0.3$$

- Mencari Nilai T_u Menggunakan Grafik P.M (Pierson Moskowitz)

$$\frac{T_n}{T_p} = 0.172$$

$$\frac{T_u}{T_p} = 0.97 \text{ (didapat dari grafik dibawah)}$$

$$T_u = 9.82 \text{ s}$$

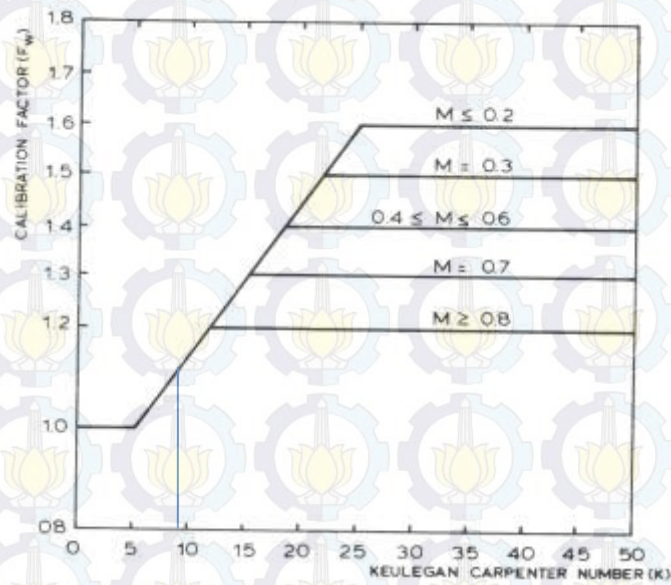


- Menghitung Faktor Kalibrasi (F_w)

$$M = \frac{U_D}{U_S} = 1.15$$

Keulegan Carpenter Number

$$K = U_S \times \frac{T_U}{D} = 9.70$$



$$F_w = 1.1 \text{ (didapat dari grafik diatas)}$$

Safety Factor

- **Lateral Stability Safety Factor**

$$SF_L = \frac{(W_S - F_L) \cdot \mu}{F_n + F_l} \geq 1,1$$

$$SF_L = 4.91 \geq 1 \quad \text{OK}$$

- **Vertical Stability Safety Faktör**

$$SF_V = \frac{W_S + B}{B} \geq 1,1$$

$$SF_V = 1.86 \geq 1,1 \quad \text{OK}$$

Kedalaman Scouring akibat arus

$$ds_{curr} = SF \times 1 \times D^{0.8} \times \frac{U^{0.4}}{1.8}$$

Dimana :

ds_{curr} = Kedalaman scouring (m)

U = Kecepatan arus efektif yang bekerja pada pipa (m/s)

D = Diameter pipa (m)

SF = Safety factor

Kedalaman scouring akibat pengaruh gelombang

$$ds_{wave} = 0,1 \times SF \times KC^{0.5} \times D$$

Dimana :

ds_{wave} = Kedalaman *scouring* (m)

KC = keulegan – carpenter number

D = Diameter pipa (m)

SF = Safety factor

$$KC = \frac{U_m \times T_p}{D}$$

Dimana :

U_m = Kecepatan maksimum partikel di *seabed* (m/s)

D = Diameter pipa

T_p = Periode gelombang (s)

$$U_m = U_b + U$$

Dimana :

U_b = *Peak orbital velocity* (m/s)

U = Kecepatan arus (m/s)

Kedalaman scouring akibat arus dan gelombang

$$ds_{\text{curr+waves}} = \left(\frac{U}{U_{\text{cr}}} \right)^{0,5} \times ds_{\text{wave}}$$

Dimana :

ds_{wave} = Kedalaman *scouring* (m)

U = Kecepatan arus (m/s)

U_{cr} = Critical velocity (m/s)

SF = Safety factor

Lebar Scouring

$$\frac{W}{D} = 0,35KC^{0,65}$$

Tabel Perhitungan *Scouring*

Fluid density : 1025 (kg / m³)

Sediment density : 2610 (kg / m³)

Kinematic fiscosity : 0.000001 (m²/s)

Safety factor : 2

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	U _{eff} (m/s)	U _{cr c} (m/s)	U _{cr,w} (m/s)	U _{cr,cw} (m/s)	Kh	U _b (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
1	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
2	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
3	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
4	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
5	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
6	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
7	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
8	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
9	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
10	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
11	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	Kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
12	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
13	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
14	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
15	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
16	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
17	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
18	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
19	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
20	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
21	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
22	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
23	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
24	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
25	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
26	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
27	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
28	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
29	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
30	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
31	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
32	0.97	53	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.334	1.059	0.623	0.124	0.545	2.51	0.18	35.10	0.04	1.25	1.30
33	0.97	53	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.334	1.059	0.623	0.124	0.545	2.51	0.18	35.10	0.04	1.25	1.30
34	0.97	53	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.334	1.059	0.623	0.124	0.545	2.51	0.18	35.10	0.04	1.25	1.30
35	0.97	53	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.334	1.059	0.623	0.124	0.545	2.51	0.18	35.10	0.04	1.25	1.30
36	0.97	52	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.338	1.063	0.622	0.124	0.542	2.46	0.19	35.37	0.05	1.30	1.34
37	0.97	52	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.338	1.063	0.622	0.124	0.542	2.46	0.19	35.37	0.05	1.30	1.34
38	0.97	52	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.338	1.063	0.622	0.124	0.542	2.46	0.19	35.37	0.05	1.30	1.34
39	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
40	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
41	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
42	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
43	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
44	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
45	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
46	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
47	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
48	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
49	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
50	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
51	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
52	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
53	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
54	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
55	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
56	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
57	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
58	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
59	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
60	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
61	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
62	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
63	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
64	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
65	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
66	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
67	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
68	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
69	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
70	0.97	45	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.374	1.098	0.617	0.124	0.514	2.14	0.26	37.53	0.06	1.71	1.77
71	0.97	43	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.385	1.110	0.616	0.124	0.506	2.06	0.28	38.26	0.07	1.86	1.92

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr · eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
72	0.97	42	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.391	1.117	0.615	0.124	0.501	2.02	0.29	38.65	0.07	1.94	2.01
73	0.97	41	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.398	1.123	0.615	0.124	0.497	1.97	0.31	39.06	0.08	2.02	2.10
74	0.97	40	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.404	1.130	0.614	0.124	0.492	1.93	0.32	39.48	0.08	2.11	2.19
75	0.97	38	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.418	1.145	0.612	0.124	0.483	1.85	0.35	40.37	0.09	2.31	2.39
76	0.46	36	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.044	0.607	0.610	0.127	0.422	1.54	0.29	25.10	0.00	0.05	0.05
77	0.46	33	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.062	0.624	0.608	0.127	0.408	1.44	0.33	26.23	0.00	0.07	0.08
78	0.46	30	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.081	0.643	0.605	0.127	0.393	1.34	0.37	27.50	0.00	0.10	0.11
79	0.46	28	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.096	0.657	0.603	0.127	0.383	1.28	0.39	28.45	0.01	0.13	0.14
80	0.46	25	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.118	0.681	0.599	0.127	0.368	1.18	0.44	30.06	0.01	0.18	0.19
81	0.46	22	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.144	0.709	0.595	0.127	0.352	1.08	0.50	31.94	0.01	0.25	0.26
82	0.46	19	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.172	0.743	0.590	0.127	0.335	0.98	0.57	34.19	0.01	0.34	0.36
83	0.46	15	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.217	0.801	0.583	0.127	0.311	0.85	0.68	38.04	0.02	0.53	0.56

Dari hasil perhitungan diatas, didapat konfigurasi hasil analisa *scouring* (*scour parameter*) sebagai berikut :

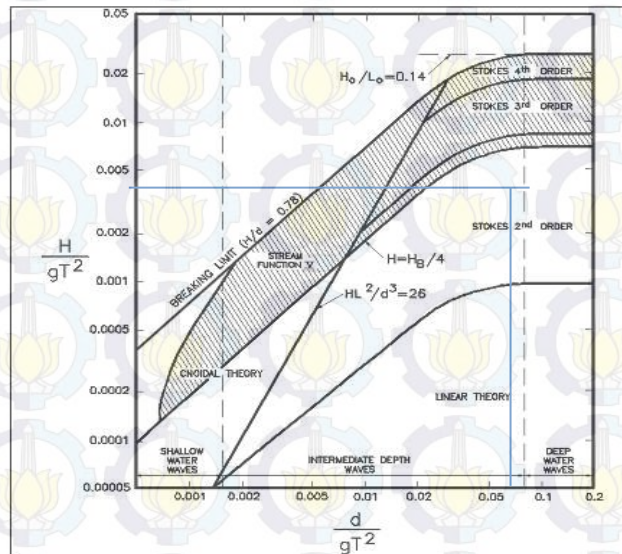
KP	scour	scour	scour	Scour
	depth	depth	depth	length
	current	waves	cur+waves	
	(m)	(m)	(m)	(m)
1	0.42	0.35	0.47	3.46
2	0.42	0.35	0.47	3.46
3	0.42	0.35	0.47	3.46
4	0.42	0.35	0.47	3.46
5	0.42	0.35	0.47	3.46
6	0.42	0.35	0.47	3.46
7	0.42	0.35	0.47	3.46
8	0.42	0.36	0.47	3.47
9	0.42	0.36	0.47	3.47
10	0.42	0.36	0.47	3.47
11	0.42	0.36	0.47	3.47
12	0.42	0.36	0.47	3.47
13	0.42	0.36	0.47	3.47
14	0.42	0.36	0.47	3.49
15	0.42	0.36	0.47	3.49
16	0.42	0.36	0.47	3.49
17	0.42	0.36	0.47	3.49
18	0.42	0.36	0.47	3.49
19	0.42	0.36	0.47	3.49
20	0.42	0.36	0.47	3.49
21	0.42	0.36	0.47	3.50
22	0.42	0.36	0.47	3.50
23	0.42	0.36	0.47	3.50
24	0.42	0.36	0.47	3.50
25	0.42	0.36	0.47	3.50
26	0.42	0.36	0.47	3.50
27	0.42	0.36	0.48	3.52
28	0.42	0.36	0.48	3.52
29	0.42	0.36	0.48	3.52
30	0.42	0.36	0.48	3.52

KP	scour	scour	scour	Scour
	depth	depth	depth	length
	current	waves	cur+waves	
	(m)	(m)	(m)	(m)
31	0.42	0.36	0.48	3.52
32	0.42	0.36	0.48	3.54
33	0.42	0.36	0.48	3.54
34	0.42	0.36	0.48	3.54
35	0.42	0.36	0.48	3.54
36	0.42	0.36	0.48	3.55
37	0.42	0.36	0.48	3.55
38	0.42	0.36	0.48	3.55
39	0.42	0.36	0.49	3.57
40	0.42	0.36	0.49	3.57
41	0.42	0.36	0.49	3.57
42	0.42	0.36	0.49	3.57
43	0.42	0.36	0.49	3.57
44	0.42	0.36	0.49	3.57
45	0.42	0.36	0.49	3.57
46	0.42	0.36	0.49	3.57
47	0.42	0.36	0.49	3.59
48	0.42	0.36	0.49	3.59
49	0.42	0.36	0.49	3.59
50	0.42	0.36	0.49	3.59
51	0.42	0.36	0.49	3.59
52	0.42	0.36	0.49	3.59
53	0.42	0.36	0.49	3.59
54	0.42	0.36	0.49	3.59
55	0.42	0.37	0.49	3.61
56	0.42	0.37	0.49	3.61
57	0.42	0.37	0.49	3.61
58	0.42	0.37	0.49	3.61
59	0.42	0.37	0.49	3.61
60	0.42	0.37	0.49	3.61

KP	scour	scour	scour	Scour
	depth	depth	depth	length
	current	waves	cur+waves	
	(m)	(m)	(m)	(m)
61	0.42	0.37	0.49	3.61
62	0.42	0.37	0.50	3.63
63	0.42	0.37	0.50	3.63
64	0.42	0.37	0.50	3.63
65	0.42	0.37	0.50	3.63
66	0.42	0.37	0.50	3.63
67	0.42	0.37	0.50	3.63
68	0.42	0.37	0.50	3.63
69	0.42	0.37	0.50	3.63
70	0.42	0.37	0.51	3.69
71	0.42	0.38	0.52	3.74
72	0.42	0.38	0.53	3.76
73	0.42	0.38	0.53	3.79
74	0.42	0.38	0.54	3.82
75	0.42	0.39	0.55	3.87
76	0.31	0.30	0.32	2.84
77	0.31	0.31	0.33	2.93
78	0.31	0.32	0.34	3.02
79	0.31	0.32	0.36	3.08
80	0.31	0.33	0.37	3.20
81	0.31	0.34	0.39	3.33
82	0.31	0.36	0.42	3.48
83	0.31	0.38	0.46	3.73

Stabilitas Pipa (deep)

- Menentukan Teori Gelombang



Input data :

$$H = 3.2 \text{ m} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad gT^2 = 725.548$$

$$T = 8.6 \text{ s} \quad d = 40 \text{ m}$$

$$H/gT^2 = 0.0044 \quad d/gT^2 = 0.055$$

>> Berdasarkan grafik tersebut, maka menggunakan teori gelombang **Stoke Orde Dua** .

Persamaan yang digunakan pada teori stoke tersebut didapat dari persamaan berikut (Mouselli, 1981) :

Kecepatan Horizontal Partikel :

$$U = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos \theta$$

$$= 4.60247\text{E-}18 + -2.5\text{E-}06$$

$$= -2.472\text{E-}06 \text{ m/s}$$

Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang Efektif (U_w)

$$U_w = 0.778 U_0^2 \frac{D}{y_0}^{0.286}$$
$$= 1.3558 \text{E-14 m/s}$$

Menghitung Kecepatan Partikel (U_D)

$$U_D = U_r \frac{\left(1 + \frac{Z_0}{D}\right) \left(\ln \left(\frac{D}{Z_0} + 1\right) - 1\right)}{\left(\ln \frac{Z_r}{Z_0} + 1\right)}$$
$$= 0.616 \text{ m/s}$$

Dengan : $U_r = 0.85 \text{ m/s}$ current speed at 10% of depth

$Z_0 = 0.000005 \text{ m/s}$ untuk tanah clay

$Z_r = 5 \text{ m/s}$ DNV

Menghitung Kecepatan Partikel Efektif (U_e)

$$U_e = 0.778 U_0^2 \frac{D}{y_0}^{0.286}$$
$$= 0.543 \text{ m/s}$$

Menghitung Kecepatan Efektif yang Mengenai Pipa (U_e)

$$U_e = U_w + U_c = \sqrt{U_w^2 + U_c^2 + 2 \cdot U_w \cdot U_c \cdot \cos \theta}$$
$$= 0.543 \text{ m/s}$$

Menghitung F_d , F_i dan F_l

$$Re = \frac{U_e \cdot D}{\nu}$$

$= 14622.1$ (masukkan ke tabel Reynolds Number)

Reynolds number (R_e)	Hydrodynamic Coefficient		
	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < R_e < 1.0 \times 10^5$	1.6	1.0	2.0
$1.0 \times 10^5 < R_e < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{R_e}{3 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$	2.0
$2.5 \times 10^5 < R_e < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$
$R_e > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

Didapat :

$C_d =$	1.3
$C_l =$	1.5
$C_i =$	2

Drag Force

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2$$

$$= 59.83 \text{ N/m}$$

Inertia Force

$$F_i = \rho C_m \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \frac{du}{dt}$$

Dengan,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta$$

$$= 0.6176 + 6.8705E-22$$

$$F_i = 91.85 \text{ N/m}$$

Lift Force

$$F_l = \frac{1}{2} \rho C_1 D U_e^2$$

$$F_l = 69.03 \text{ N/m}$$

Menghitung Berat Terendam Pipa (W_s)

- **Diameter Luar Pipa (D)**

$$D = D_0 + 2.t_{\text{corr}} + 2.t_c$$

$$= 0.385 \text{ m}$$

- **Diameter Dalam Pipa (D_i)**

$$D_i = D_0 - 2.t_{\text{st}}$$

$$D_i = 0.283 \text{ m}$$

- **Berat Baja di Udara (W_{st})**

$$W_{\text{st}} = \pi/4 \rho_{\text{st}} (D_o^2 - D_i^2) g$$

$$W_{\text{st}} = 731.492 \text{ N/m}$$

- **Berat Lapisan Anti Karat di Udara (W_{corr})**

$$W_{\text{corr}} = \pi/4 \rho_{\text{corr}} [(D_o + 2.t_{\text{corr}})^2 - D_i^2] g$$

$$W_{\text{corr}} = 132.129 \text{ N/m}$$

- **Berat Selimut Beton di Udara (W_c)**

$$W_c = \pi/4 \rho_c [(D_o + 2.t_{\text{corr}} + 2.t_c)^2 - (D_o + 2.t_{\text{corr}})^2] g$$

$$W_c = 1293.965 \text{ N/m}$$

- **Berat Pengisi Pipa (W_{cont})**

$$W_{\text{cont}} = D_i^2 \cdot \rho_{\text{cont}} \cdot g$$

$$W_{\text{cont}} = 27.025 \text{ N/m}$$

- **Bouyancy (B)**

$$B = \pi/4 \rho_w (D_o + 2t_{corr} + 2t_c)^2 \cdot g$$

$$B = 1169.995 \quad \text{N/m}$$

- **Berat Terendam Pipa (Ws)**

$$W_s = W_{st} + W_{corr} + W_c + W_{cont} - B$$

$$W_s = 1014.616 \quad \text{N/m}$$

- **Berat Terendam Minimum Pipa (Ws_req)**

$$W_{s_req} = \left[\frac{(F_D + F_I) + \mu \cdot F_L}{\mu} \right] \cdot F_w$$

$$= 314.31 \text{ N/m}$$

Perhitungan Koefisien Hidrodinamika

- **Menghitung Periode Natural Gelombang Pada Kedalaman (T_n)**

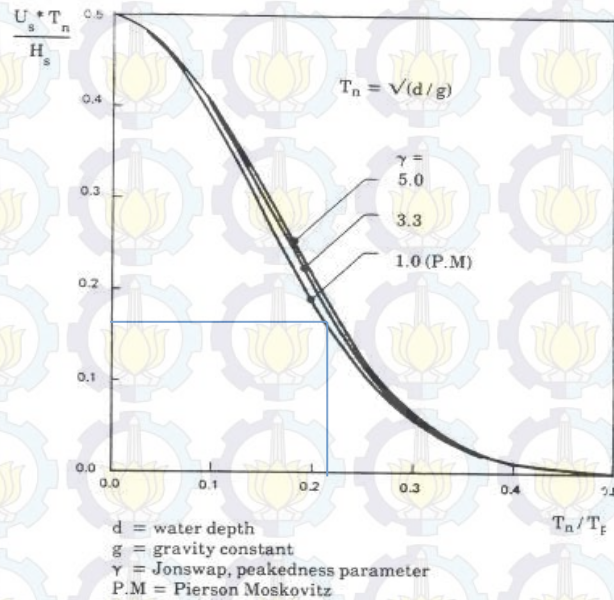
$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}}$$

$$= 2.01$$

$$T_p = 9.3 \text{ s}$$

$$\frac{T_n}{T_p} = 0.217$$

- Mencari Nilai U_s Menggunakan Grafik P.M (Pierson Moskowitz)



$$\theta = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$= 5.198$$

$$\gamma = 5 ; \text{if } \theta \leq 3,6 \cdot \frac{\text{sec}}{\sqrt{m}}$$

$$\gamma = 1 ; \text{if } \theta \leq 5 \cdot \frac{\text{sec}}{\sqrt{m}}$$

$$\gamma = 3,3 \text{ otherwise}$$

$$(U_s \cdot T_n) / H_s = 0.16 \text{ (didapat dari grafik diatas)}$$

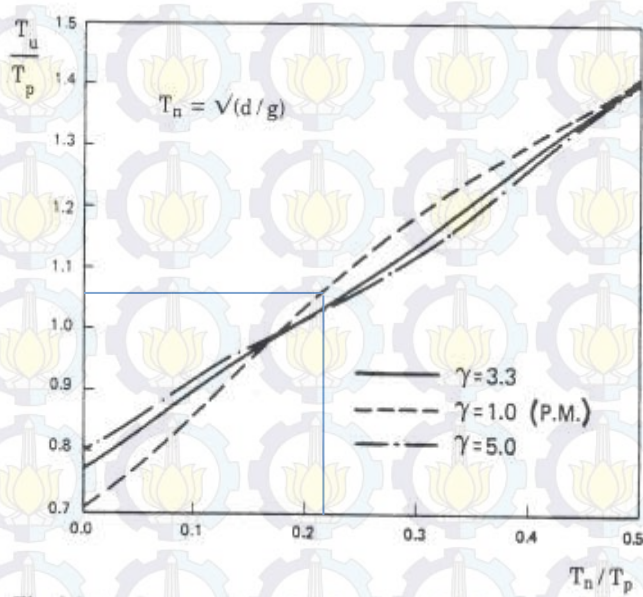
$$U_s = 0.253$$

- Mencari Nilai T_u Menggunakan Grafik P.M (Pierson Moskowitz)

$$\frac{T_n}{T_p} = 0.217$$

$$\frac{T_u}{T_p} = 1.05 \text{ (didapat dari grafik dibawah)}$$

$$T_u = 9.76 \text{ s}$$

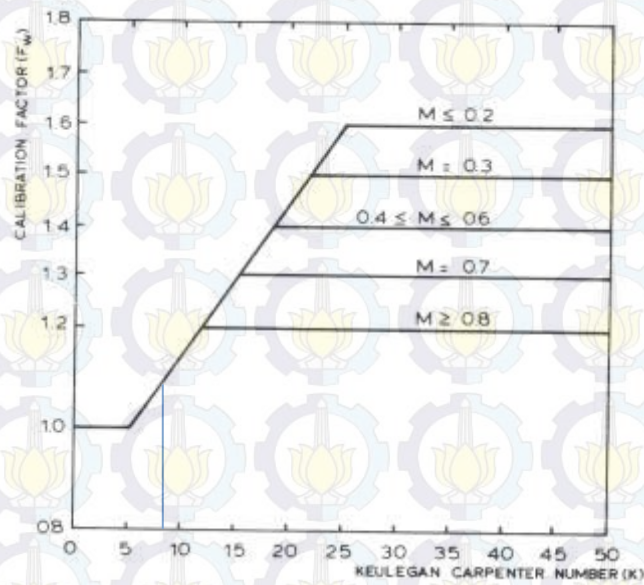


- Menghitung Faktor Kalibrasi (F_w)

$$M = \frac{U_D}{U_S} = 2.43$$

Keulegan Carpenter Number

$$K = U_S \times \frac{T_U}{D} = 8.14$$



$$F_w = 1.1 \text{ (didapat dari grafik diatas)}$$

Safety Factor

- **Lateral Stability Safety Factor**

$$SF_L = \frac{(W_S - F_L) \cdot \mu}{F_n + F_l} \geq 1,1$$

$$SF_L = 4.36 \geq 1 \quad \text{OK}$$

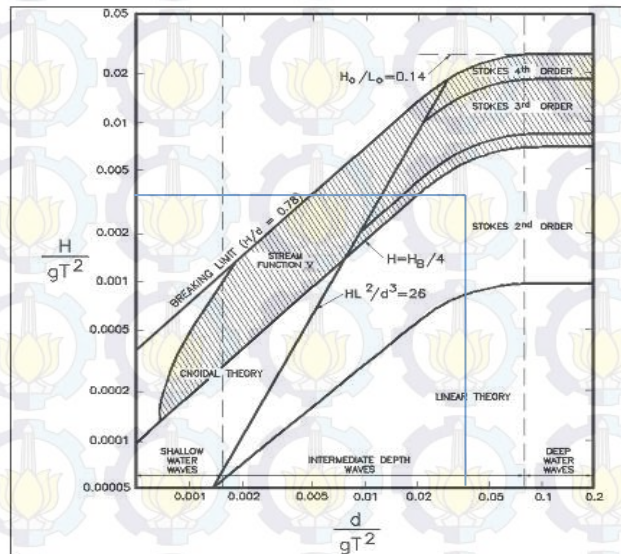
- **Vertical Stability Safety Faktör**

$$SF_V = \frac{W_S + B}{B} \geq 1,1$$

$$SF_V = 1.86 \geq 1,1 \quad \text{OK}$$

Stabilitas Pipa (intermediate)

- Menentukan Teori Gelombang



Input data :

$$H = 2.1 \text{ m} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad gT^2 = 659.62$$

$$T = 8.2 \text{ s} \quad d = 30 \text{ m}$$

$$H/gT^2 = 0.00318 \quad d/gT^2 = 0.0454$$

>> Berdasarkan grafik tersebut, maka menggunakan teori gelombang **Stoke Orde Dua**.

Persamaan yang digunakan pada teori stoke tersebut didapat dari persamaan berikut (Mouselli, 1981) :

Kecepatan Horizontal Partikel :

$$\begin{aligned} U &= \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd} \cos \theta \\ &= 6.0316\text{E-}18 + -2.2\text{E-}05 \\ &= -1.804\text{E-}05 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang Efektif (U_w)

$$U_w = 0.778 U_0^2 \frac{D}{y_0}^{0.286}$$
$$= 1.287 \text{E-12 m/s}$$

Menghitung Kecepatan Partikel (U_D)

$$U_D = U_r \frac{\left(1 + \frac{Z_0}{D}\right) \left(\ln \left(\frac{D}{Z_0} + 1\right) (-1)\right)}{\left(\ln \frac{Z_r}{Z_0} + 1\right)}$$
$$= 0.346 \text{ m/s}$$

Dengan : $U_r = 0.46 \text{ m/s}$ current speed at 10% of depth

$Z_0 = 0.000005 \text{ m/s}$ untuk tanah clay

$Z_r = 3 \text{ m/s}$ DNV

Menghitung Kecepatan Partikel Efektif (U_e)

$$U_e = 0.778 U_0^2 \frac{D}{y_0}^{0.286}$$
$$= 0.305 \text{ m/s}$$

Menghitung Kecepatan Efektif yang Mengenai Pipa (U_e)

$$U_e = U_w + U_c = \sqrt{U_w^2 + U_c^2 + 2 \cdot U_w \cdot U_c \cdot \cos \theta}$$
$$= 0.305 \text{ m/s}$$

Menghitung F_d , F_i dan F_l

$$Re = \frac{U_e \cdot D}{\nu}$$

$= 8216.9$ (masukkan ke tabel Reynolds Number)

Reynolds number (R_e)	Hydrodynamic Coefficient		
	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < R_e < 1.0 \times 10^5$	1.6	1.0	2.0
$1.0 \times 10^5 < R_e < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \frac{R_e}{3 \times 10^5}$	$1.2 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$	2.0
$2.5 \times 10^5 < R_e < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$
$R_e > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

Didapat :

$C_d =$	1.3
$C_l =$	1.5
$C_i =$	2

Drag Force

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_e^2$$

$$= 18.89 \text{ N/m}$$

Inertia Force

$$F_I = \rho C_m \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \frac{du}{dt}$$

Dengan,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta$$

$$= 0.823 + 5.071 \text{E-}21$$

$$F_i = 122.45 \text{ N/m}$$

Lift Force

$$F_l = \frac{1}{2} \rho C_1 D U_e^2$$

$$F_l = 21.80 \text{ N/m}$$

Menghitung Berat Terendam Pipa (W_s)

- **Diameter Luar Pipa (D)**

$$D = D_0 + 2.t_{\text{corr}} + 2.t_c$$

$$= 0.385 \text{ m}$$

- **Diameter Dalam Pipa (D_i)**

$$D_i = D_0 - 2.t_{\text{st}}$$

$$D_i = 0.283 \text{ m}$$

- **Berat Baja di Udara (W_{st})**

$$W_{\text{st}} = \pi/4 \rho_{\text{st}} (D_o^2 - D_i^2) g$$

$$W_{\text{st}} = 731.492 \text{ N/m}$$

- **Berat Lapisan Anti Karat di Udara (W_{corr})**

$$W_{\text{corr}} = \pi/4 \rho_{\text{corr}} [(D_o + 2.t_{\text{corr}})^2 - D_i^2] g$$

$$W_{\text{corr}} = 132.129 \text{ N/m}$$

- **Berat Selimut Beton di Udara (W_c)**

$$W_c = \pi/4 \rho_c [(D_o + 2.t_{\text{corr}} + 2.t_c)^2 - (D_o + 2.t_{\text{corr}})^2] g$$

$$W_c = 1293.965 \text{ N/m}$$

- **Berat Pengisi Pipa (W_{cont})**

$$W_{\text{cont}} = D_i^2 \cdot \rho_{\text{cont}} \cdot g$$

$$W_{\text{cont}} = 27.025 \text{ N/m}$$

- **Bouyancy (B)**

$$B = \pi/4 \rho_w (D_o + 2t_{corr} + 2t_c)^2 \cdot g$$

$$B = 1169.995 \text{ N/m}$$

- **Berat Terendam Pipa (Ws)**

$$W_s = W_{st} + W_{corr} + W_c + W_{cont} - B$$

$$W_s = 1014.616 \text{ N/m}$$

- **Berat Terendam Minimum Pipa (Ws_req)**

$$W_{s_req} = \left[\frac{(F_D + F_I) + \mu \cdot F_L}{\mu} \right] \cdot F_w$$

$$= 246.101 \text{ N/m}$$

Perhitungan Koefisien Hidrodinamika

- **Menghitung Periode Natural Gelombang Pada Kedalaman (T_n)**

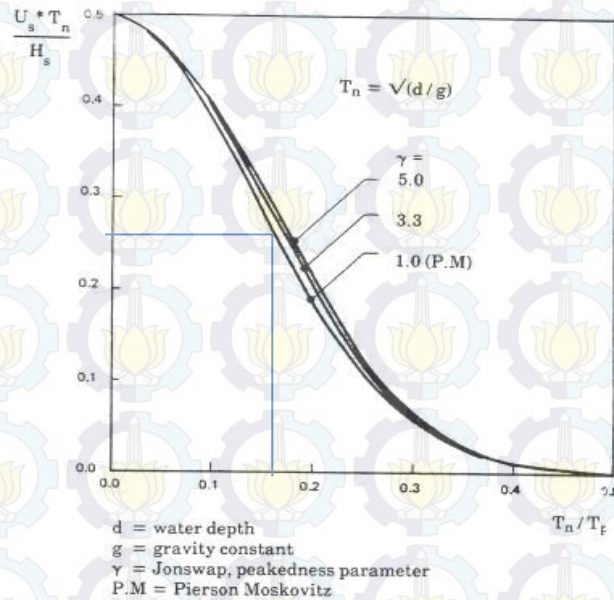
$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}}$$

$$= 2.01$$

$$T_p = 10.13 \text{ s}$$

$$\frac{T_n}{T_p} = 0.172$$

- Mencari Nilai U_s Menggunakan Grafik P.M (Pierson Moskowitz)



$$\theta = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$= 6.99$$

$$\gamma = 5 ; \text{if } \theta \leq 3,6 \cdot \frac{\text{sec}}{\sqrt{m}}$$

$$\gamma = 1 ; \text{if } \theta \leq 5 \cdot \frac{\text{sec}}{\sqrt{m}}$$

$$\gamma = 3,3 \text{ otherwise}$$

$$(U_s \cdot T_n) / H_s = 0.25 \text{ (didapat dari grafik diatas)}$$

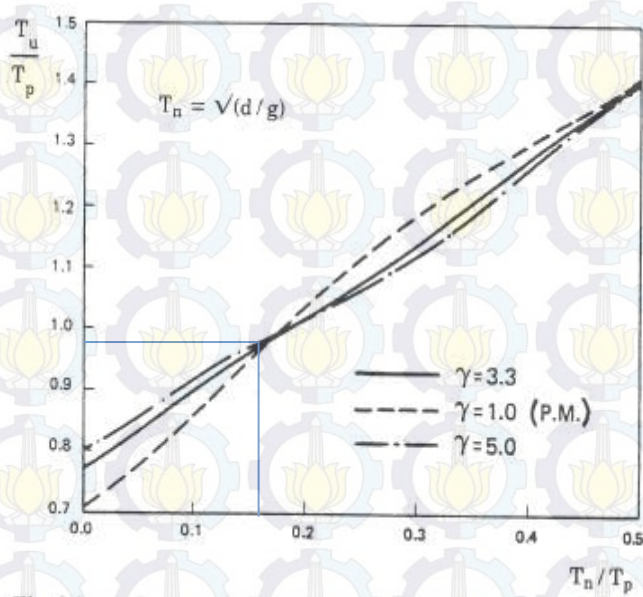
$$U_s = 0.3$$

- Mencari Nilai T_u Menggunakan Grafik P.M (Pierson Moskowitz)

$$\frac{T_n}{T_p} = 0.172$$

$$\frac{T_u}{T_p} = 0.97 \text{ (didapat dari grafik dibawah)}$$

$$T_u = 9.82 \text{ s}$$

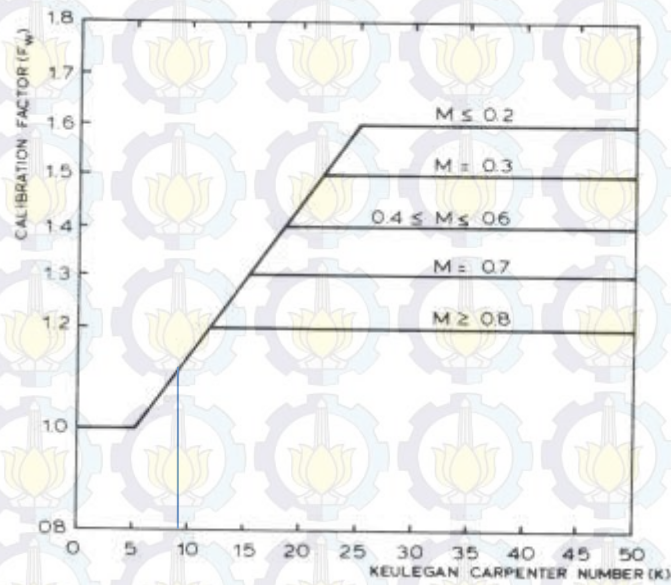


- Menghitung Faktor Kalibrasi (F_w)

$$M = \frac{U_D}{U_S} = 1.15$$

Keulegan Carpenter Number

$$K = U_S \times \frac{T_U}{D} = 9.70$$



$$F_w = 1.1 \text{ (didapat dari grafik diatas)}$$

Safety Factor

- **Lateral Stability Safety Factor**

$$SF_L = \frac{(W_S - F_L) \cdot \mu}{F_n + F_l} \geq 1,1$$

$$SF_L = 4.91 \geq 1 \quad \text{OK}$$

- **Vertical Stability Safety Faktör**

$$SF_V = \frac{W_S + B}{B} \geq 1,1$$

$$SF_V = 1.86 \geq 1,1 \quad \text{OK}$$

Tabel Perhitungan *Scouring*

Fluid density : 1025 (kg / m³)

Sediment density : 2610 (kg / m³)

Kinematic fiscosity : 0.000001 (m²/s)

Safety factor : 2

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr ,cw (m/s)	Kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
1	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
2	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
3	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
4	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
5	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
6	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
7	0.97	58	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.313	1.040	0.625	0.124	0.562	2.75	0.14	33.94	0.04	1.05	1.09
8	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
9	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
10	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
11	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	Kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
12	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
13	0.97	57	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.317	1.043	0.625	0.124	0.559	2.70	0.15	34.15	0.04	1.09	1.12
14	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
15	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
16	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
17	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
18	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
19	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
20	0.97	56	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.321	1.047	0.624	0.124	0.556	2.65	0.15	34.37	0.04	1.12	1.16
21	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
22	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
23	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
24	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
25	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21
26	0.97	55	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.325	1.051	0.624	0.124	0.552	2.60	0.16	34.61	0.04	1.16	1.21

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
27	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
28	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
29	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
30	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
31	0.97	54	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.329	1.055	0.623	0.124	0.549	2.55	0.17	34.85	0.04	1.21	1.25
32	0.97	53	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.334	1.059	0.623	0.124	0.545	2.51	0.18	35.10	0.04	1.25	1.30
33	0.97	53	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.334	1.059	0.623	0.124	0.545	2.51	0.18	35.10	0.04	1.25	1.30
34	0.97	53	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.334	1.059	0.623	0.124	0.545	2.51	0.18	35.10	0.04	1.25	1.30
35	0.97	53	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.334	1.059	0.623	0.124	0.545	2.51	0.18	35.10	0.04	1.25	1.30
36	0.97	52	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.338	1.063	0.622	0.124	0.542	2.46	0.19	35.37	0.05	1.30	1.34
37	0.97	52	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.338	1.063	0.622	0.124	0.542	2.46	0.19	35.37	0.05	1.30	1.34
38	0.97	52	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.338	1.063	0.622	0.124	0.542	2.46	0.19	35.37	0.05	1.30	1.34
39	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
40	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
41	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
42	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
43	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
44	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
45	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
46	0.97	51	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.343	1.068	0.621	0.124	0.538	2.41	0.20	35.64	0.05	1.35	1.40
47	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
48	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
49	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
50	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
51	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
52	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
53	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
54	0.97	50	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.347	1.072	0.621	0.124	0.534	2.37	0.20	35.93	0.05	1.40	1.45
55	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
56	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr. eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
57	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
58	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
59	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
60	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
61	0.97	49	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.352	1.077	0.620	0.124	0.530	2.32	0.21	36.22	0.05	1.46	1.51
62	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
63	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
64	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
65	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
66	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
67	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
68	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
69	0.97	48	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.357	1.082	0.620	0.124	0.526	2.28	0.22	36.53	0.05	1.51	1.57
70	0.97	45	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.374	1.098	0.617	0.124	0.514	2.14	0.26	37.53	0.06	1.71	1.77
71	0.97	43	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.385	1.110	0.616	0.124	0.506	2.06	0.28	38.26	0.07	1.86	1.92

KP	U (m/s)	Ho (m)	D (m)	d50 (m)	d90 (m)	hs (m)	Tp (s)	α (curr · eff)	Ueff (m/s)	Ucr c (m/s)	Ucr,w (m/s)	Ucr,c w (m/s)	kh	Ub (m/s)	KC	Bed load (kg/s/m)	Sus. Tran (kg/s/m)	Tot.Sand transport (kg/s/m)
72	0.97	42	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.391	1.117	0.615	0.124	0.501	2.02	0.29	38.65	0.07	1.94	2.01
73	0.97	41	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.398	1.123	0.615	0.124	0.497	1.97	0.31	39.06	0.08	2.02	2.10
74	0.97	40	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.404	1.130	0.614	0.124	0.492	1.93	0.32	39.48	0.08	2.11	2.19
75	0.97	38	0.304	6.25E-05	5E-07	3.2	9.3	1.418	1.145	0.612	0.124	0.483	1.85	0.35	40.37	0.09	2.31	2.39
76	0.46	36	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.044	0.607	0.610	0.127	0.422	1.54	0.29	25.10	0.00	0.05	0.05
77	0.46	33	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.062	0.624	0.608	0.127	0.408	1.44	0.33	26.23	0.00	0.07	0.08
78	0.46	30	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.081	0.643	0.605	0.127	0.393	1.34	0.37	27.50	0.00	0.10	0.11
79	0.46	28	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.096	0.657	0.603	0.127	0.383	1.28	0.39	28.45	0.01	0.13	0.14
80	0.46	25	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.118	0.681	0.599	0.127	0.368	1.18	0.44	30.06	0.01	0.18	0.19
81	0.46	22	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.144	0.709	0.595	0.127	0.352	1.08	0.50	31.94	0.01	0.25	0.26
82	0.46	19	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.172	0.743	0.590	0.127	0.335	0.98	0.57	34.19	0.01	0.34	0.36
83	0.46	15	0.304	6.25E-05	5E-07	2.1	10.13	1.217	0.801	0.583	0.127	0.311	0.85	0.68	38.04	0.02	0.53	0.56

Dari hasil perhitungan diatas, didapat konfigurasi hasil analisa *scouring* (*scour parameter*) sebagai berikut :

KP	scour	scour	scour	Scour
	depth	depth	depth	length
	current	waves	cur+waves	
	(m)	(m)	(m)	(m)
1	0.42	0.35	0.47	3.46
2	0.42	0.35	0.47	3.46
3	0.42	0.35	0.47	3.46
4	0.42	0.35	0.47	3.46
5	0.42	0.35	0.47	3.46
6	0.42	0.35	0.47	3.46
7	0.42	0.35	0.47	3.46
8	0.42	0.36	0.47	3.47
9	0.42	0.36	0.47	3.47
10	0.42	0.36	0.47	3.47
11	0.42	0.36	0.47	3.47
12	0.42	0.36	0.47	3.47
13	0.42	0.36	0.47	3.47
14	0.42	0.36	0.47	3.49
15	0.42	0.36	0.47	3.49
16	0.42	0.36	0.47	3.49
17	0.42	0.36	0.47	3.49
18	0.42	0.36	0.47	3.49
19	0.42	0.36	0.47	3.49
20	0.42	0.36	0.47	3.49
21	0.42	0.36	0.47	3.50
22	0.42	0.36	0.47	3.50
23	0.42	0.36	0.47	3.50
24	0.42	0.36	0.47	3.50
25	0.42	0.36	0.47	3.50
26	0.42	0.36	0.47	3.50
27	0.42	0.36	0.48	3.52
28	0.42	0.36	0.48	3.52
29	0.42	0.36	0.48	3.52
30	0.42	0.36	0.48	3.52

KP	scour	scour	scour	Scour
	depth	depth	depth	length
	current	waves	cur+waves	
	(m)	(m)	(m)	(m)
31	0.42	0.36	0.48	3.52
32	0.42	0.36	0.48	3.54
33	0.42	0.36	0.48	3.54
34	0.42	0.36	0.48	3.54
35	0.42	0.36	0.48	3.54
36	0.42	0.36	0.48	3.55
37	0.42	0.36	0.48	3.55
38	0.42	0.36	0.48	3.55
39	0.42	0.36	0.49	3.57
40	0.42	0.36	0.49	3.57
41	0.42	0.36	0.49	3.57
42	0.42	0.36	0.49	3.57
43	0.42	0.36	0.49	3.57
44	0.42	0.36	0.49	3.57
45	0.42	0.36	0.49	3.57
46	0.42	0.36	0.49	3.57
47	0.42	0.36	0.49	3.59
48	0.42	0.36	0.49	3.59
49	0.42	0.36	0.49	3.59
50	0.42	0.36	0.49	3.59
51	0.42	0.36	0.49	3.59
52	0.42	0.36	0.49	3.59
53	0.42	0.36	0.49	3.59
54	0.42	0.36	0.49	3.59
55	0.42	0.37	0.49	3.61
56	0.42	0.37	0.49	3.61
57	0.42	0.37	0.49	3.61
58	0.42	0.37	0.49	3.61
59	0.42	0.37	0.49	3.61
60	0.42	0.37	0.49	3.61

KP	scour	scour	scour	Scour
	depth	depth	depth	length
	current	waves	cur+waves	
	(m)	(m)	(m)	(m)
61	0.42	0.37	0.49	3.61
62	0.42	0.37	0.50	3.63
63	0.42	0.37	0.50	3.63
64	0.42	0.37	0.50	3.63
65	0.42	0.37	0.50	3.63
66	0.42	0.37	0.50	3.63
67	0.42	0.37	0.50	3.63
68	0.42	0.37	0.50	3.63
69	0.42	0.37	0.50	3.63
70	0.42	0.37	0.51	3.69
71	0.42	0.38	0.52	3.74
72	0.42	0.38	0.53	3.76
73	0.42	0.38	0.53	3.79
74	0.42	0.38	0.54	3.82
75	0.42	0.39	0.55	3.87
76	0.31	0.30	0.32	2.84
77	0.31	0.31	0.33	2.93
78	0.31	0.32	0.34	3.02
79	0.31	0.32	0.36	3.08
80	0.31	0.33	0.37	3.20
81	0.31	0.34	0.39	3.33
82	0.31	0.36	0.42	3.48
83	0.31	0.38	0.46	3.73

Kedalaman Scouring akibat arus

$$ds_{curr} = SF \times 1 \times D^{0.8} \times \frac{U^{0.4}}{1.8}$$

Dimana :

ds_{curr} = Kedalaman scouring (m)

U = Kecepatan arus efektif yang bekerja pada pipa (m/s)

D = Diameter pipa (m)

SF = Safety factor

Kedalaman scouring akibat pengaruh gelombang

$$ds_{wave} = 0,1 \times SF \times KC^{0.5} \times D$$

Dimana :

ds_{wave} = Kedalaman *scouring* (m)

KC = keulegan – carpenter number

D = Diameter pipa (m)

SF = Safety factor

$$KC = \frac{U_m \times T_p}{D}$$

Dimana :

U_m = Kecepatan maksimum partikel di *seabed* (m/s)

D = Diameter pipa

T_p = Periode gelombang (s)

$$U_m = U_b + U$$

Dimana :

U_b = *Peak orbital velocity* (m/s)

U = Kecepatan arus (m/s)

Kedalaman scouring akibat arus dan gelombang

$$ds_{\text{curr+waves}} = \left(\frac{U}{U_{\text{cr}}} \right)^{0,5} \times ds_{\text{wave}}$$

Dimana :

ds_{wave} = Kedalaman *scouring* (m)

U = Kecepatan arus (m/s)

U_{cr} = Critical velocity (m/s)

SF = Safety factor

Lebar Scouring

$$\frac{w}{D} = 0,35KC^{0,65}$$

BIODATA PENULIS



Faris Rasyadi, anak pertama dari dua bersaudara ini lahir di Surabaya pada tanggal 14 Desember 1993. Pendidikan formal penulis dimulai dengan menyelesaikan jenjang Pendidikan Dasar di SDN Dr Sutomo V Surabaya pada tahun 2005 dan SMP Negeri 12 Surabaya pada tahun 2008. Kemudian menyelesaikan jenjang Pendidikan Menengah di SMA Negeri 6 Surabaya pada tahun 2011. Lulus dari SMA, penulis melanjutkan ke jenjang Pendidikan Tinggi Strata 1 di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 4311 100 087. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis sangat aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan dan kebudayaan, juga dalam berbagai pelatihan, seminar, dan kegiatan. Dalam bidang organisasi kemahasiswaan, penulis pernah bergabung menjadi staf kaderisasi HIMATEKLA 2013 – 2014. Dalam bidang kebudayaan, penulis adalah CAK SURABAYA 2013 dan menjadi anggota paguyuban CAK & NING SURABAYA hingga saat ini. Penulis pernah berkesempatan untuk melaksanakan kerja praktik di PT. ALSTOM POWER ESI, Surabaya pada tahun 2014. Selama masa studi, penulis sangat tertarik dengan bidang proses dan struktur pantai sehingga hal itulah yang mendasari penulis untuk membuat tugas akhir ini dengan fokus *crossing pipeline*. Penulis dapat dihubungi melalui farislaut11@gmail.com.